



**Politechnika Gdańska**  
**WYDZIAŁ ELEKTRONIKI**  
**TELEKOMUNIKACJI I INFORMATYKI**



Katedra: Systemów Multimedialnych

Imię i nazwisko dyplomanta: **Rafał Rybacki**  
**Mariusz Adam Kurkowski**

Nr albumu: odpowiednio 97317, 97244

Forma i poziom studiów: Dienne inż./mgr – poz. magisterski

Kierunek studiów: Telekomunikacja



Temat pracy: **System śledzenia punktu fiksacji wzroku na monitorze komputerowym**

Kierujący pracą: prof. zw. dr hab. inż. Andrzej Czyżewski

Konsultant pracy: dr inż. Piotr Ody

Zakres pracy: Opracowanie stanowiska i oprogramowania do prowadzenia ćwiczeń  
zręcznościowych przy pomocy komputera

**Streszczenie:**

W pracy dokonano przeglądu w zakresie inwazyjnych i nieinwazyjnych metod śledzenia punktu fiksacji wzroku. Dodatkowo przedstawiono przykładowy system do prowadzenia ćwiczeń zręcznościowych przy pomocy komputera. W części praktycznej zaimplementowano wybrane algorytmy wykorzystujące metody przetwarzania obrazu oraz opracowano prototypowe stanowisko komputerowe, służące nieinwazyjnemu śledzeniu punktu fiksacji wzroku na monitorze komputerowym przy pomocy kamery internetowej działającej w zakresie podczerwieni.

**Abstract:**

This thesis contains the review within the context of the invasive and non-invasive methods of eye gaze tracking. Moreover, this work introduces examples of systems dedicated to practice with the use of a computer. In the practical part some chosen algorithms were implemented employing methods of image processing. A prototype of a computer workstation for non-invasive methods of eye gaze tracking was constructed. This serves to non-invasive eye gaze tracking using the Internet camera in the range of infra-red.

**Gdańsk, 2008 rok**

Autorzy rozdziałów:

Rozdział 1, 2.1, 2.2, 3, 4, 5, 7.2 – Mariusz Kurkowski

Rozdział 2.3, 6, 7.1, 7.3 – Rafał Rybacki

## SPIS TREŚCI

|                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Wprowadzenie .....                                                         | 5  |
| 2. Budowa i własności oka.....                                                | 8  |
| 2.1. Budowa oka .....                                                         | 8  |
| 2.1.1. Anatomia gałki ocznej .....                                            | 8  |
| 2.1.2. Układ mięśniowy.....                                                   | 9  |
| 2.1.3. Połączenie z mózgiem .....                                             | 10 |
| 2.2. Proces widzenia .....                                                    | 11 |
| 2.3. Właściwości widzenia.....                                                | 12 |
| 2.3.1 Okno optyczne.....                                                      | 12 |
| 2.3.2 Rozdzielczość wzroku .....                                              | 13 |
| 2.3.3 Bezwładność wzroku.....                                                 | 13 |
| 2.3.4 Zbieżność oczu .....                                                    | 13 |
| 2.3.5 Typy ruchów oczu .....                                                  | 14 |
| 2.3.6 Oko a światło podczerwone.....                                          | 15 |
| 3. Wybrane metody i realizacje systemów śledzenia punktu fiksacji wzroku..... | 17 |
| 3.1 Wybrane metody śledzenia punktu fiksacji wzroku .....                     | 17 |
| 3.2 Wybór oświetlenia .....                                                   | 21 |
| 4. Założenia projektowe.....                                                  | 24 |
| 4.1 Cel.....                                                                  | 24 |
| 4.2 Założenia sprzętowe.....                                                  | 24 |
| 4.3 Budowa stanowiska i kalibracja systemu .....                              | 25 |
| 5. Symulacje.....                                                             | 26 |
| 5.1 Algorytm przetwarzania obrazu.....                                        | 26 |
| 5.1.1. Opis algorytmu .....                                                   | 27 |
| 5.1.2. Wyznaczenie obszaru zainteresowania .....                              | 29 |
| 5.1.3. Wykrywanie glintów .....                                               | 31 |
| 5.1.4. Wykrywanie środka źrenicy .....                                        | 35 |
| 5.1.5. Algorytm korekcji przesunięć .....                                     | 37 |

|                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------|-----|
| 5.1.6. Implementacja algorytmu w środowisku Matlab .....        | 39  |
| 5.2. Detekcja punktu fiksacji wzroku .....                      | 41  |
| 5.2.1. Proponowane algorytmy .....                              | 41  |
| 5.2.1.1 Algorytm wirtualnych punktów – linii.....               | 41  |
| 5.2.1.2 Algorytm odległościowy .....                            | 44  |
| 5.2.3. Implementacja algorytmów w środowisku Matlab .....       | 48  |
| 5.3. Wyniki badań .....                                         | 50  |
| 6. System detekcji punktu fiksacji wzroku .....                 | 54  |
| 6.1 Warstwa sprzętowa.....                                      | 54  |
| 6.1.1 System z przełączaniem programowym.....                   | 55  |
| 6.1.2 System z przełączaniem sprzętowym.....                    | 64  |
| 6.1.3 Wyniki badań .....                                        | 66  |
| 6.2 Oprogramowanie systemu .....                                | 71  |
| 6.2.1 Środowisko pracy i wymagania sprzętowe .....              | 72  |
| 6.2.2 Opis aplikacji .....                                      | 74  |
| 6.2.3 Wykorzystane narzędzia i środowisko programistyczne ..... | 76  |
| 6.2.4 Algorytm działania aplikacji .....                        | 77  |
| 6.2.5 Podsumowanie .....                                        | 97  |
| 6.3 Testy i badania.....                                        | 97  |
| 6.3.1 Warunki wykonywania pomiarów .....                        | 97  |
| 6.3.2 Wyniki badań i analiza wyników .....                      | 99  |
| 6.3.3 Podsumowanie .....                                        | 118 |
| 7. Podsumowanie .....                                           | 119 |
| 7.1 Wyniki pracy .....                                          | 119 |
| 7.2 Praktyczne zastosowanie .....                               | 119 |
| 7.3 Podsumowanie pracy .....                                    | 121 |
| 7.4 Perspektywy rozwoju .....                                   | 122 |
| 8. Bibliografia .....                                           | 123 |
| 9. Dodatki.....                                                 | 127 |

## 1. Wprowadzenie

Fiksacja to stan względnego spoczynku wzroku – patrzenie w konkretnym kierunku czy skupienie wzroku na konkretnym obiekcie niezależnie od ruchów głowy. Podczas fiksacji zachodzi pobieranie informacji wzrokowej z otoczenia. Dzięki temu procesowi można m.in. skupić wzrok na danym przedmiocie poruszając jednocześnie głową.

Od wielu już lat człowiek próbuje stworzyć doskonały system śledzenia punktu fiksacji wzroku, z różnymi tego skutkami. W pracy tej postarano się przybliżyć różne sposoby pomiarów, koncentrując się szczegółowo na jednej z wybranych metod.

W pierwszej części pracy został przytoczony pokrótce rys historyczny systemu śledzenia punktu fiksacji wzroku i zmieniające się z czasem jego zastosowanie. Pierwsze próby mierzenia punktu fiksacji wzroku przeprowadzano już w XIX wieku, były to jednak systemy inwazyjne, niebezpieczne dla zdrowia. Pierwsze nieinwazyjne metody sięgają początku XX wieku; wykorzystywały one fakt odbicia światła na rogówce.

W części pierwszej pracy został pokrótce przybliżony rys historyczny systemu śledzenia punktu fiksacji wzroku i zmieniające się z czasem jego zastosowanie.

Pierwsze próby pomiaru punktu fiksacji wzroku przeprowadzane zostały już w XIX wieku. Były to jednak systemy inwazyjne, często niebezpieczne dla zdrowia. Pierwsze nieinwazyjne metody sięgają początków XX wieku- wykorzystywały one fakt odbicia światła na rogówce. s

W kolejnym rozdziale przedstawiono cechy charakterystyczne narządu wzroku, pozwalające w pełni zrozumieć procesy zachodzące w czasie badania: opisano zatem budowę oka z wyszczególnieniem jego elementów oraz właściwości widzenia, dzięki którym śledzi się punkt fiksacji wzroku. Następnie scharakteryzowano poszczególne metody inwazyjne i nieinwazyjne. Jeżeli w badaniu następuje ingerencja w organizm, np. umieszczanie specjalnych soczewek na oku, metodę tę zalicza się do inwazyjnych metod poznawczych. W pracy niniejszej omówione aktualne metody badań, takie jak: okulografy nagłowne i soczewki kontaktowe.

Jeśli system śledzenia punktu fiksacji wzroku polega na bezkontaktowym badaniu, nazywa się go bezinwazyjnym. Jest on o wiele częściej stosowany, ze względu na wygodę oraz mniejsze ryzyko uszkodzenia narządu wzroku. Tego typu systemy bazują

na algorytmach przetwarzania obrazu. Najczęściej stosuje się komputerowe systemy rozpoznawania obrazu oraz wykorzystuje pomiar charakterystyk geometrycznych oka.

W pracy zostały wymienione metody bazujące na śledzeniu rąbka rogówki lub źrenicy, śledzeniu odbić światła od rogówki lub źrenicy, sztucznych sieci neuronowych, metodzie ANS. Stosowana w tego typu systemach kamera może być umieszczona w odpowiednio przygotowanym hełmie, bądź też w niedalekiej odległości od badanego.

Większość podobnych komercyjnych systemów korzysta ze źródła światła bliskiej podczerwieni, aby w następnej kolejności badać jego odbicie na powierzchni rogówki (zwane pierwszym obrazem Purkiniego). Odbicie to jest później obierane jako punkt referencyjny – odniesienia przy wyznaczaniu punktu fiksacji, gdyż wraz z ruchem oka jego położenie się nie zmienia, w przeciwieństwie do odbicia na źrenicy.

Do często stosowanych systemów śledzenia punktu fiksacji na ekranie monitora komputerowego można zaliczyć system zbudowany z 4 źródeł IR LED i kamery CCD.

W niniejszej pracy zostanie on dość szczegółowo omówiony.

Poruszone zostało również zagadnienie śledzenia punktu fiksacji wzroku na podstawie tylko jednego źródła IR LED.

W kolejnym rozdziale autorzy pracy omawiają założenia projektowe oraz analizują ważniejsze problemy występujące w czasie budowy urządzenia. Uzasadniają ponadto wybór metody zastosowanej w projekcie oraz dobór źródła bliskiej podczerwieni. Istotnym problemem jest także konstrukcja stanowiska pomiarowego.

Z założenia jest to system dla typowego użytkownika komputera, tak więc zwrócono uwagę na prostotę urządzenia oraz przystępną cenę poszczególnych elementów. Warto wspomnieć także, iż jednym z kluczowych założeń projektu było to, że w opracowywanym systemie wykorzystano zwykłą kamerę internetową.

W rozdziale 4. przedstawiono konfigurację techniczną urządzeń wykorzystanych w systemie. Omówiono także parametry sprzętu umożliwiającego śledzenie punktu fiksacji na monitorze komputera. Następnie opisano użyte narzędzia i biblioteki służące w czasie implementacji części programowej. W końcowej części rozdziału autorzy skupili się na analizie funkcjonalności tworzonego oprogramowania.

W ramach części praktycznej pracy dyplomowej- skonstruowano kompletny system fiksacji wzroku oraz zrealizowano szeroki zestaw symulacji i testów. Opracowane zostały algorytmy w środowisku Matlab. W kolejnej części opracowania dokonano opisu stworzonego w ramach prac systemu działającego w czasie rzeczywistym jako gotowy produkt.

Przeanalizowano dokładnie budowę stanowiska pomiarowego, wyszczególniając newralgiczne jego punkty. Następnie przedstawiono i zanalizowano uzyskane wyniki pomiarowe ze zwróceniem szczególnej uwagi na zastosowanie systemu w metodach terapii osób z zaburzonymi wadami rozwojowymi.

Ostatnią część pracy stanowi analiza i podsumowanie wyników uzyskanych w trakcie realizacji systemu śledzenia punktu fiksacji wzroku.

Wyciągnięto wnioski oraz opisano spostrzeżenia, dotyczące działania podobnych systemów. Przedstawiono zastosowania systemu oraz możliwe sposoby rozwinięcia pracy. Poruszono także temat programów usprawniających podobne systemy oraz nadające im nowe zastosowanie.

## **2. Budowa i własności oka**

Oko ludzkie jest miejscem, w którym zaczyna się proces widzenia. Obraz rejestrowany przez oko jest przez nie wstępnie przetwarzany i nerwem wzrokowym kierowany do mózgu. Tam przez odpowiednie ośrodki jest rejestrowany, przetwarzany i interpretowany. Chcąc analizować procesy zachodzące w gałce ocznej, należy w pierwszej kolejności przyjrzeć się dokładniej budowie anatomicznej oka. W niniejszym rozdziale przedstawiono wybrane zagadnienia budowy i własności oka ludzkiego oraz opisano wstępnie proces widzenia. Informacje te są niezbędne do prawidłowego zrozumienia procesu fiksacji wzroku.

### **2.1. Budowa oka**

Anatomiczną postacią zmysłu wzorku jest narząd wzroku. Składa się on z gałki ocznej, aparatu ochronnego i aparatu ruchowego oka oraz połączeń nerwowych siatkówki oka ze strukturami mózgu. Gałka oczna znajduje się w przedniej części oczodołu i porusza się dzięki ruchom mięśni ocznych w zagłębieniu utworzonym min. przez tkankę tłuszczową oczodołu. Ma w przybliżeniu kształt kuli, wypełnionej w większości bezpostaciową substancją (ciałkiem szklistym), znajdującej się pod ciśnieniem pozwalającym na utrzymanie kształtu. [12]

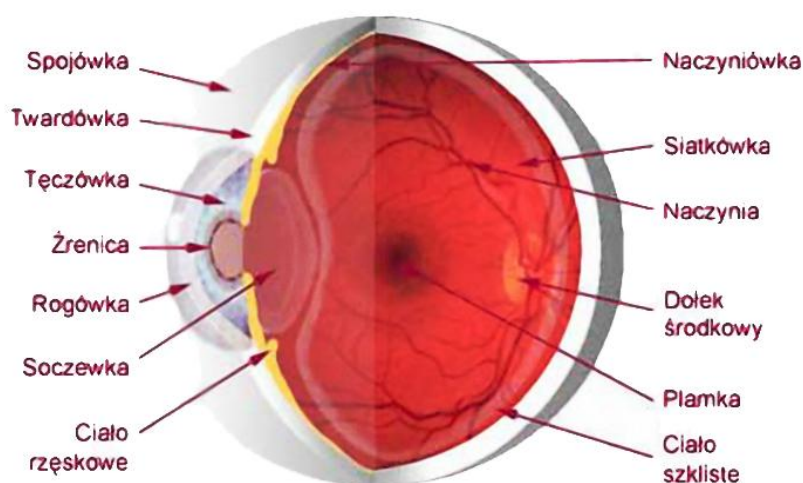
#### **2.1.1. Anatomia gałki ocznej**

Gałka oczna zbudowana jest z soczewki oraz trzech błon: zewnętrznej błony włóknistej (twardówka i rogówka), środkowej naczyniowej (tęczówka, ciało rzęskowe, naczyniówka) oraz wewnętrznej czuciowej (siatkówka). Najbardziej zewnętrzną część oka stanowi twardówka. Zbudowana jest ona z nieprzeźroczystej błony włóknistej łącznotkankowej. W przedniej części oka przechodzi w rogówkę, która zbudowana jest z przeźroczystej błony i kształtem przypomina wypukłe szkiełko od zegarka. Część naczyniową, znajdującą się między twardówką i siatkówką stanowi naczyniówka, która wraz z tęczówką tworzy błonę naczyniową. Znajdują się w niej naczynia krwionośne. Tęczówka jest umięśnioną częścią błony naczyniowej otaczającej otwór nazywany źrenicą. Dzięki zawartemu w niej pigmentowi jest kolorowa. To właśnie jej mięśnie



pozwalają na zwiększanie lub zmniejszanie dopływu światła przez regulację wielkości źrenicy. Soczewka jest zawieszona między tęczówką a ciałem szklistym na obwodce rzęskowej. W odpowiednim położeniu utrzymuje ją ciało rzęskowe []. Część wewnętrzną gałki ocznej stanowi siatkówka, receptorowa część oka. Składa się z trzech warstw, przy czym najbliższa śródka oka warstwa składa się z czopków i pręcików - komórek światłoczułych, a dwie pozostałe z neuronów przewodzących bodźce wzrokowe. Znajduje się na niej również plamka żółta, będąca miejscem o największym skupieniu czopków - cechuje się największą wrażliwością na barwy i światło. Nieco niżej jest się plamka ślepa - miejsce pozbawione komórek światłoczułych, przez co niewrażliwe na światło. Jest zbiegiem nerwów łączących komórki światłoczułe z nerwem wzrokowym.

Układ optyczny w pewnym uproszczeniu uważać można za centryczny. Środki krzywizn rogówki i soczewki leżą na prostej zwanej osią optyczną oka [10]. Na rys 2.1 przedstawiono schemat budowy oka.

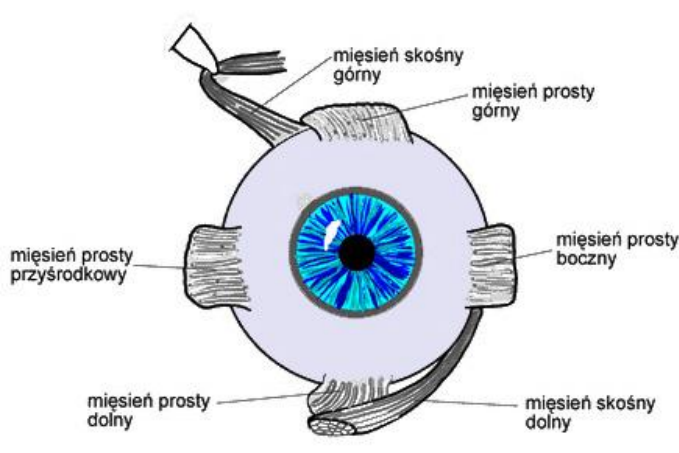


Rys. 2.1. Uproszczony schemat budowy oka [31]

### 2.1.2. Układ mięśniowy

Gałką oczną porusza sześć mięśni zewnętrznych oka. Są to cztery mięśnie proste: górny, dolny, wewnętrzny i zewnętrzny, których tylne przyczepy znajdują się w szczycie. Natomiast przednie przyczepy są przymocowane do gałki ocznej w odległości przeciętnie 7 mm od rąbka, w położeniu zgodnym z ustawieniem wskazówki zegara kolejno na godzinie 3, 6, 9, 12. Bardziej złożony jest natomiast przebieg mięśni skośnych, które warunkują odpowiednie ruchy oczu. Mięsień skośny górny kieruje gałkę oczną ku dołowi, odwodzi ją na zewnątrz i skręca do wewnątrz (ku nosowi). Mięsień skośny dolny obraca gałkę ku górze, na zewnątrz, a skręca ku skroni. Ruchy oczu zdrowego człowieka oraz równoległe ich ustawienie uwarunkowane jest odpowiednim ich unerwieniem i

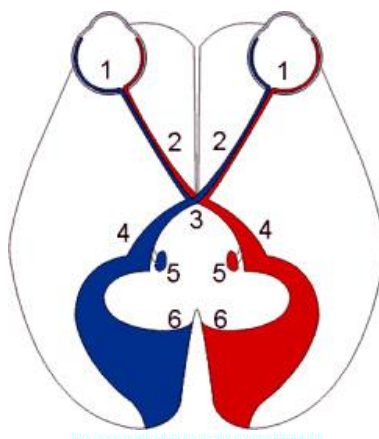
ukrwieniem. Nawet przy niewielkiej dysfunkcji mięśniowej może nastąpić dwojenie obrazu. Na rys 2.2 przedstawiono przybliżony rozkład mięśni gałki ocznej [10].



Rys. 2.2. Mięśnie gałki ocznej [32]

### 2.1.3. Połączenie z mózgiem

Siatkówki oczu są połączone z korą wzrokową półkul mózgowych w obu częściach mózgu. Nerwy wzrokowe łączą się bezpośrednio przed wejściem do wgłębienia czaszki, tworząc skrzyżowanie wzrokowe. Następnie dzielą się one ponownie na dwa rozgałęzienia, tzw. drogi wzrokowe, które łącząc się z ciałem kolankowatym bocznym, prowadzą do obu części kory wzrokowej. Miejsce zwane skrzyżowaniem wzrokowym jest to punkt, w którym nerw wzrokowy z każdego oka rozdziela się na dwie drogi wzrokowe w taki sposób, że każda z nich zawiera włókna wzrokowe pochodzące z obu oczu. W układzie takim lewa połowa kory wzrokowej przetwarza informacje wizualne pochodzące z lewej strony siatkówki obu oczu (prawa strona pola widzenia), natomiast prawa połowa kory wzrokowej zajmuje się prawą stroną każdej z siatkówek (lewa strona pola widzenia) [33]. Na rys. 2.3 przedstawiono przykładowy przebieg drogi wzrokowej.



**Rys. 2.3. Schemat ideowy drogi wzrokowej [33]**

Powyższy schemat ideowy, pokazuje jak siatkówki łączą się z kory wzrokową (1 - siatkówka, 2 - nerw wzrokowy, 3 - skrzyżowanie wzrokowe, 4 - droga wzrokowa, 5 - ciało kolankowate boczne, 6 - kora wzrokowa)

## 2.2. Proces widzenia

Widzenie jest złożonym procesem fizyczno-psychicznym, który składa się z trzech etapów: przyjęcia bodźca, jego przewodzenia oraz zebrania i poznania go. Warunki te spełnia prawidłowo zbudowany i funkcjonujący układ wzrokowy. Światło wpadające do oka biegnie przez rogówkę, komorę przednią oka, soczewkę i ciało szkliste do siatkówki – pierwszego istotnego elementu procesu widzenia. Obraz przez nią zarejestrowany jest wstępnie przetwarzany i za pośrednictwem nerwów łączących się w nerw wzrokowy kierowany do mózgu. Tam też przez odpowiednie ośrodki jest rejestrowany, przetwarzany i poddawany interpretacji. Oczami odbiera się około 80% wszystkich informacji o otoczeniu, a aż do 10% komórek nerwowych kory mózgowej zaangażowanej jest w interpretację tych informacji.

Rogówka, wraz z ciekłą wodnistą, soczewką i ciałem szklistym, stanowi układ skupiający promienie świetlne tak, by na siatkówce pojawiał się obraz ostry obserwowanego przedmiotu, dający jak najostrzejsze wrażenie wzrokowe. Dlatego też soczewka ma możliwość zmiany swojego kształtu, a co za tym idzie, mocy optycznej. Pozwala to na ogniskowanie na siatkówce przedmiotów znajdujących się w różnych odległościach od oka. Zdolność tę nazywa się akomodacją. Do soczewki przylega

tęczówka spełniająca rolę przysłony aperturowej kurczącej się pod wpływem bodźców świetlnych, co powoduje zmianę średnicy źrenicy wejściowej oka.

Dużą zdolność rozdzielczą i możliwość rozróżniania kolorów człowiek zawdzięcza światłoczułym receptorom zwanym pręcikami oraz czopkami. Pręciki są wysoce światłoczułe i głównie odpowiedzialne za wykrywanie kształtu i ruchu. Nie radzą sobie jednak z rozróżnianiem kolorów. Z drugiej strony czopki są mniej wrażliwe na światło, ale posiadają zdolność rozróżniania kolorów. Umożliwiają one również postrzeganie drobnych szczegółów. W momencie, gdy czułość czopków jest niewystarczająca do prowadzenia obserwacji, mimo dużych wymiarów źrenicy, funkcję receptorów przejmują pręciki.

Proces widzenia ma charakter elektrochemiczny. Gdy w siatkówce komórki pręcikowe lub czopki zostają pobudzone światłem, chemiczna kompozycja pigmentu zmienia się chwilowo. Skutkiem jest powstanie niewielkiej wartości prądu elektrycznego, który przechodzi do mózgu poprzez włókna nerwowe. Z pojedynczym włóknem nerwowym połączonych jest około sto pręcików.[10].

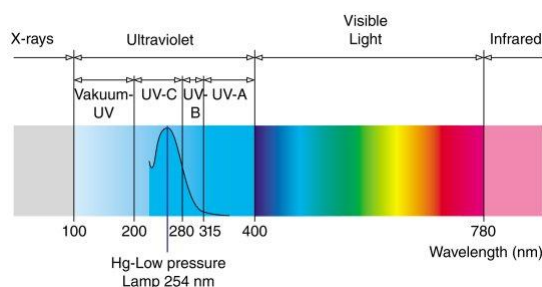
## **2.3. Właściwości widzenia**

Ludzkie oko jest wysoko wyspecjalizowanym narządem, podstawowym źródłem akwizycji informacji o otoczeniu. Jego prawidłowe funkcjonowanie polega na wykorzystaniu szeregu właściwości fizyko-chemicznych oraz biologicznych. Efektywne działanie procesu widzenia wymaga istnienia wielu specyficznych mechanizmów i właściwości. Poniżej opisano kilka właściwości wzroku niezbędnych do rozważań w dalszej części pracy.

### **2.3.1 Okno optyczne**

Ludzkie oko działa jak pasmowo-przepustowy filtr fal elektromagnetycznych. Jest to związane z właściwościami fizycznymi i chemicznymi elementów budowy oka – rogówki, czopków oraz pręcików. Zakres promieniowania odbierany przez oko zawiera się od około 400 nm do ok. 700 nm. Pasma to nazywane jest oknem optycznym oka ludzkiego. Powyżej długości 780nm znajduje się niewidoczna dla człowieka

podczerwień, a poniżej 400nm, również niewidoczny, ultrafiolet. Przedział okna optycznego na skali częstotliwości prezentuje rysunek 2.4.



Rys. 2.4 Okno optyczne oka ludzkiego[37]

### 2.3.2 Rozdzielczość wzroku

Rozdzielczość wzroku jest to najmniejsza odległość, mierzona kątowno, przy której człowiek może rozróżnić dwa punkty jako oddzielne. Zdolność rozdzielcza oka wynosi zazwyczaj powyżej 1 minuty kątowej (bardzo dobry wzrok) – dla przeciętnego wzroku wynosi ona ok. 3 minuty kątowe. Wzrok scharakteryzować można również wielkością normalnej progowej percepcji wzrokowej. Jest to kąt widzenia, przy którym można rozróżniać szczegóły przedmiotów. Dla przeciętnego wzroku wynosi on około 5 minut kątowych [10].

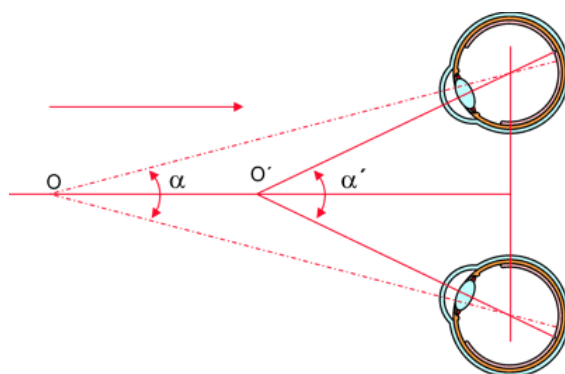
### 2.3.3 Bezwładność wzroku

Bezwładność wzroku jest to kolejna właściwość widzenia mająca swoje źródło w budowie fizyko-chemicznej narządu wzroku. Zjawisko to odpowiada za opóźnienie czasowe pomiędzy powstaniem wrażenia świetlnego u obserwatora a bodźcem wywołującym to wrażenie oraz na opóźnienie w eliminacji wrażenia po zakończeniu trwania bodźca. Oko przechowuje informacje o bodźcu przez około 0.1 sekundy.

### 2.3.4 Zbieżność oczu

Zbieżność oczu jest właściwością widzenia, która pozwala na skupienie obu oczu w jednym punkcie. Efekt ten powoduje, że osie optyczne oczu przecinają się w obserwowanym punkcie. Precyzyjne sterowanie pracą oczu dokonywane jest przez

mięśnie oka, sterowane przez centralny układ nerwowy. Czynność przystosowania kierunku patrzenia trwa nie więcej niż kilka dziesiątych sekundy i może być wykonywana niezależnie od procesu akomodacji lub adaptacji. Na rys. 2.5 przedstawiono schemat poglądowy zbieżności oczu.



Rys. 2.5 Zbieżność oczu [33]

### 2.3.5 Typy ruchów oczu

Praca gałki ocznej polega na wyborze i akwizycji obrazu otoczenia człowieka. Precyzyjny wybór miejsca akwizycji możliwy jest dzięki ruchom gałki ocznej. Ruchy te, jak wspomniano w rozdziale 2.1.2, sterowane są przez cztery mięśnie oka. Ruch pionowy jest zsynchronizowany, to znaczy gałki jednocześnie są przemieszczane pod tym samym kątem (mimo niezależnych mięśni). Ruchy gałki ocznej możemy podzielić na podlegające woli człowieka oraz ruchy bezwarunkowe.

Ruchy warunkowane przez wolę człowieka to ruchy sakkadowe, łagodne śledzenie oraz ruch wergencyjny. Ruchy sakkadowe są to ruchy skokowe charakteryzujące się bardzo dużą prędkością kątową (do  $900^\circ$  na sekundę). Podczas występowania osiągana częstotliwość może dochodzić do 3-5 Hz. Jest to ruch przemieszczający centrum pola widzenia w poszukiwaniu nowych bodźców wzrokowych. Łagodne śledzenie to ruch polegający na płynnym przemieszczaniu osi optycznych za obiektem wzroku celem utrzymania go w polu widzenia. Zazwyczaj ruch ten poprzedzony jest sakkadą. Ruch wergencyjny (konwergencja wzroku) jest to zmiana położenia gałek ocznych tak, aby zachować ich zbieżność dla obserwowanego obiektu. Efekt zbieżności oczu istnieje zatem dzięki ruchom wergencyjnym.

Ruchy bezwarunkowe, niezależnie od woli ludzkiej, to odruch przedsionka oka (*ang. Vestibular-Ocular Reflex - VOR*) i odpowiedź optokinetyczna (*ang. Opto-Kinetic Response - OKR*). Ruch VOR ma na celu stabilizację obrazu na siatkówce w trakcie gwałtownych ruchów ciała. Korekcyjny obrót oczu wykonywany jest na podstawie informacji o kierunku i wartości przyspieszeń głowy. Ruch ten zapewnia utrzymanie obiektu w polu widzenia. Ruch OKR jest działaniem kompensującym zmiany pozycji głowy przy wolnych i ciągłych przemieszczeniach. Wykonywany jest na podstawie informacji o przepływie tła [10].

### **2.3.6 Oko a światło podczerwone**

Promieniowanie podczerwone leży poza pasmem okna optycznego, co sprawia, że oko ludzkie nie odbiera tych fal jako widzialnych. Jednak promieniowanie to może wywołać wzrost temperatury tkanki. Długotrwała ekspozycja na intensywne promieniowanie (szczególnie z zakresu IR-A) może doprowadzić również do zwiększonego obciążenia cieplnego organizmu. Najbardziej na to promieniowanie narażona jest gałka oczna. Podczerwień najsilniej jest pochłaniana przez rogówkę oka. Nadmierna ekspozycja na to promieniowanie może powodować oparzenia rogówki, wysuszenie powiek, stany zapalne tęczówki i spojówki a nawet uszkodzenie siatkówki. Najpoważniejszą chorobą związaną z promieniowaniem podczerwonym jest zaćma, czyli zmętnienie soczewki. Maksymalne dopuszczalne średnie natężenie napromieniowania oka światłem podczerwonym wynosi  $150 \text{ W/m}^2$ .

Oko jest specjalnie przystosowane do odbioru i przetwarzania promieniowania optycznego. Lasery działające w zakresie widzialnym i bliskiej podczerwieni są szczególnie niebezpieczne dla oka, ponieważ właśnie te cechy, które są niezbędne, aby oko było skutecznym przetwornikiem światła, powodują występowanie dużego napromienienia na mocno zabarwionych tkankach.

W zakresie długości fal od 400 nm do 1 400 nm największym zagrożeniem jest uszkodzenie siatkówki. Rogówka, ciecz wodnista, soczewka i ciało szkliste są przezroczyste dla promieniowania o tych długościach fal. W przypadku dobrze skolimowanej wiązki zagrożenie jest niezależne od odległości między źródłem promieniowania a okiem. Przyczyną jest fakt, że wraz ze zmniejszeniem odległości rośnie moc zbierana przez oko, podczas gdy wymiary obrazu na siatkówce mogą być uważane

za zachowujące ograniczenie dyfrakcyjne dla rzeczywistych źródeł laserowych odległych o ponad 100 mm. W przypadku źródła „typu punktowego” o rozbieżnej wiązce, zagrożenie wzrasta wraz ze zmniejszaniem odległości między przewężeniem wiązki a okiem.

Zgodnie z polską normą, za najkrótszą odległość akomodacji oka ludzkiego dla wszystkich długości fal ustalono 100 mm w zakresie od 400 nm do 1 400 nm. Był to wybór kompromisowy, ponieważ wszyscy, poza niektórymi młodymi osobami i niektórymi krótkowidzami, nie potrafią akomodować oczu przy odległościach mniejszych od 100 mm [17].



### **3. Wybrane metody i realizacje systemów śledzenia punktu fiksacji wzroku**

W rozdziale tym opisane zostały ważniejsze składowe projektu, przykładowe realizacje poszczególnych etapów. Skupiono się na interpretacji i uzasadnieniu wybranego rozwiązania.

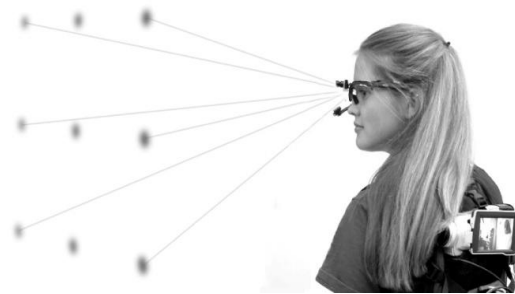
#### **3.1 Wybrane metody śledzenia punktu fiksacji wzroku**

Istnieje wiele badań nad pomiarem kierunku patrzenia, bazujących przede wszystkim na odbiciach światła od powierzchni oka. Metody te w większości korzystają z obserwacji punktu odbicia światła na źrenicy - tzw. glintu i środka źrenicy. Jednakże punkt fiksacji wzroku nie może być dokładnie wyznaczony tylko na podstawie kierunku patrzenia. Powstało wiele różnorodnych metod, które bazują na obserwacji różnych charakterystycznych punktów. Niektóre z nich polegają na obserwacji specyficznych obszarów oka lub głowy w celu uzyskania poprawnego pomiaru.

Już od początków XIX wieku trwały badania nad analizą kierunku patrzenia człowieka. Jednymi z pierwszych systemów śledzenia fiksacji wzroku były:

- ✦ Bezpośrednia obserwacja
- ✦ Mechaniczny zapis ruchów oczu
- ✦ Inwazyjny system kreślący wykres ruchów - poprzez system bloczków nitka połączona była z narzędziem kreślącym na zwyczajnej kartce papieru, z drugiej zaś strony z okiem pacjenta pod znieczuleniem. Dzięki temu, kiedy pacjent ruszał gałkami ocznymi, na przesuwającej się kartce papieru można było rejestrować wykres ruchów.
- ✦ Analiza zarejestrowanych odbić światła na błonie fotograficznej.
- ✦ Filmowanie powierzchni oka.

Systemy badania fiksacji wzroku dzielimy, w zależności od stopnia ingerencji badania w organizm, na inwazyjne i nieinwazyjne. Jeżeli w badaniu następuje ingerencja w organizm, np. umieszczanie specjalnych soczewek na oku, metodę tę zalicza się do inwazyjnych metod poznawczych. Gdy system śledzenia punktu fiksacji wzroku polega na bezkontaktowym badaniu, metodę nazywa się bezinwazyjną. Stosuje się również podział systemów ze względu na czas pomiaru. Rozróżnia się systemy on-line - metody służące do badania punktu fiksacji wzroku w czasie rzeczywistym, wykorzystywane przede wszystkim do sterowania kursorem. Gdy punkt fiksacji jest wyznaczany przez odpowiednie algorytmy, dopiero po pewnym czasie po zarejestrowaniu niezbędnych informacji przez urządzenia pomiarowe, mówimy wówczas o systemach off-line. Systemy te wymagają pełnej synchronizacji kamery rejestrującej otoczenie i śledzącej wzrok. Jeżeli nie chodzi nam o działanie systemu w czasie rzeczywistym, to metody off-line dadzą prawdopodobnie lepsze rezultaty. Powodem tego jest dokładniejsze działanie algorytmów, a przede wszystkim dobór algorytmu po wstępnej analizie całości materiału, często łatwiejsza kalibracja oraz mniejsze straty w pozyskiwaniu informacji na temat położenia punktu fiksacji wzroku [11].



Rys. 3.1. Przykład systemu off-line [7]

### Wybrane systemy inwazyjne

- Szkła kontaktowe - *Contact lenses*

Dzięki szklom kontaktowym możliwe jest śledzenie gałki ocznej badanego, a jednocześnie proste i dokładne ( $0.08^\circ$ ) wyliczanie punktów fiksacji wzroku. Znane są przynajmniej trzy metody pomiaru za pomocą soczewek. Najprostszą z nich jest wyliczanie punktów fiksacji za pomocą odpowiedniego rodzaju mechanizmu dźwigniowego, znajdującego się na powierzchni soczewki. Kolejna metoda używa małych zwierciadeł zamieszczonych na powierzchni szkła, gdzie kierunek patrzenia jest wyliczany na podstawie odbicia promienia świetlnego, skierowanego w kierunku luster. Trzecia metoda jest jeszcze bardziej wymyślna. Używane są niewielkie cewki indukcyjne zamieszczone wewnątrz szkła. Duża częstotliwość pól elektromagnetycznych

wokół głowy pozwala osiągnąć bardzo zadawalające wyniki. Jest to najbardziej inwazyjna metoda. Bezpośrednie soczewki przylegają do rogówki, a żeby mieć pewność nieprzemieszczenia ich w trakcie badania, stosuje się odpowiednie mechaniczne lub chemiczne środki zapobiegające ślizganiu soczewek.

#### ○ Elektrookulografia - EOG

Jest to jedna z tańszych metod. Opiera się ona na istnieniu elektrostatycznych pól znajdujących się wokół oka. Elektrody ułożone wokół oczodołu na skórze wyłapują nawet małe zmiany potencjałów, świadczące o ruchach oka. Metoda nie wymaga samego spojrzenia w oko. Niestety w EOG występuje kilka problemów związanych min. z ruchami mięśni głowy czy przesłuchami sygnałów [11].



Rys. 3.2. EOG [11]

#### Wybrane systemy nieinwazyjne

Jest wiele metod bazujących na tych systemach badania. Możemy wymienić tu śledzenie rąbka rogówki lub źrenicy, śledzenie odbić światła od rogówki lub źrenicy czy sztuczne sieci neuronowe. Kamera może być umieszczona w odpowiednio przygotowanym hełmie, bądź umieszczona gdzieś niedaleko. Uzasadnionym wyborem jest śledzenie rąbka rogówki – kolorowa część graniczna pomiędzy twardówką a tęczówką – gdzie występuje dość duży kontrast. Problemem może być przykrycie szukanego punktu przez powiekę, jednak problem ten został wyeliminowany przy pomocy odpowiednich algorytmów. Możemy też śledzić źrenicę, nie mając problemu z powiekami; niestety w takim przypadku kontrast pomiędzy tęczówką a źrenicą jest za mały. Wadami obu metod jest fakt, że głowa badanego musi pozostawać cały czas w jednej pozycji. Problem jest rozwiązywany przy pomocy algorytmów śledzących oczy wraz z ruchem głowy lub specjalnych hełmów zakładanych na głowę badanego [ 8].

Systemy nieinwazyjne wykorzystują min:

- Odbicia promieni świetlnych – światło wpadające do oka powoduje pojawienie się odbić na granicy soczewki z rogówką – zwanymi Purkiniego. Pomimo bardzo dobrej dokładności, jest to metoda używana tylko w odpowiednio wyposażonych pomieszczeniach - laboratoriach. Powodem jest konieczność bardzo dokładnego ustawienia zakresu światła [16] .
- Metody ANS – związane z autonomicznym systemem nerwowym, wykorzystują model trójwymiarowy oka ludzkiego. Dane zbierane są w płaszczyznach: pionowej, poziomej i skrętnej [6].
- IR - większość komercyjnych systemów korzysta ze źródła światła bliskiej podczerwieni, by w następnej kolejności badać jego odbicie na powierzchni rogówki (zwane pierwszym obrazem Purkiniego). Odbicie to jest później brane jako punkt referencyjny – odniesienia, przy wyznaczaniu punktu fiksacji, gdyż wraz z ruchem oka jego położenie się nie zmienia, w przeciwieństwie do odbicia na źrenicy [3].

Typowe systemy wykrywają położenie gałki ocznej i jej orientację, co przekłada się na niebezpieczeństwo niedokładnych pomiarów, a co za tym idzie dużą niewiarygodność miejsca punktu fiksacji wzroku. Dodatkowo początkowe systemy, oparte w szczególności o źródło IR, wymagały stałej, a co więcej, znanej odległości głowy od kamery. W proponowanym przez nas rozwiązaniu nie potrzebujemy informacji na temat pozycji oka, system jest w dużym stopniu odporny na ruchy głowy. Jest to niewątpliwie wielką jego zaletą, zwłaszcza przy zastosowaniu systemu do terapii ludzi młodych. Co więcej, system ten nie wymaga utrzymania niezmiennego odległości głowy od monitora - źródeł IR. Opiera on swoje działanie na wykryciu czterech punktów referencyjnych powstałych przez odbicia zestawów diod LED zamieszczonych na narożnikach komputerach, oraz środka źrenicy – wykrywanej na podstawie obrazu oświetlonego przez piątą z diod.



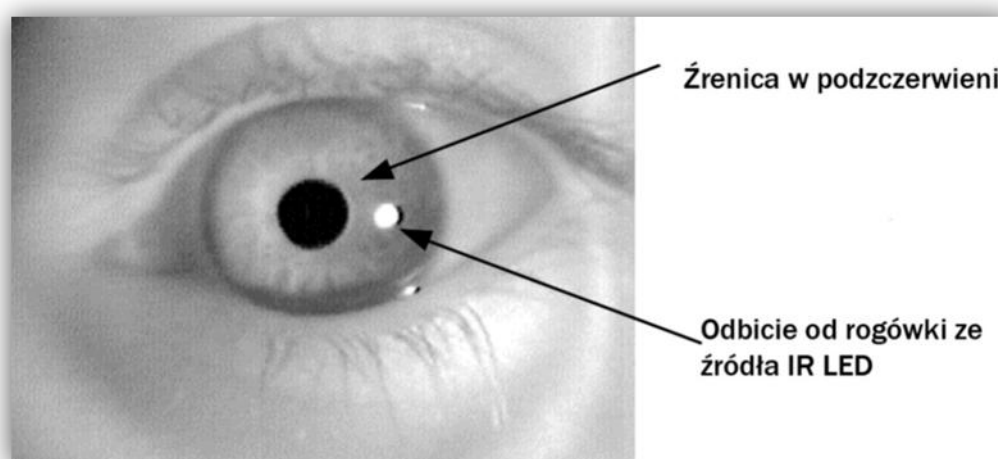
**Rys. 3.3. Przykład  
helmu stosowanego  
w systemach on-line [11]**



Rys. 3.4. System zbudowany z 5 LED IR oraz 2 kamer [3]

### 3.2 Wybór oświetlenia

W systemie wykorzystane jest zjawisko odbicia światła od rogówki, które jest widoczne jako jasny punkt (ang. *glint*) – punkt referencyjny. Na podstawie ich obserwacji i pewnych zależności matematycznych, określa się punkt fiksacji wzroku. Więcej informacji na temat odbierania przez oko ludzkie pasma podczerwieni zostało zawartych w roz. 2.3.6.



Rys. 3.5. Oko w podczerwieni [7]

Wybór źródła oświetlenia powierzchni oka wydawał się być stosunkowo oczywisty. Większość istniejących rozwiązań opiera się o źródło bliskiej podczerwieni. Najlepiej jeśli jest to długość 850nm, ponieważ krzem, z którego wykonuje się obiektywy kamer ma maksimum czułości dla tej długości fali.

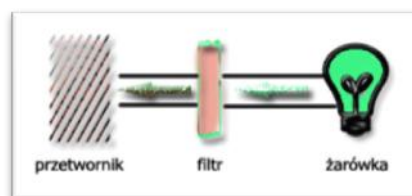
Zaletami używania promieni IR są min:

- ❖ względna niewrażliwość oka ludzkiego na pasmo bliskiej podczerwieni,
- ❖ lepszy kontrast poszczególnych składowych klatki, a co za tym idzie łatwiejsze wykrywanie brzegów poszczególnych części oka oraz glintów.
- ❖ dostępność źródeł LED,
- ❖ czułość matrycy kamery pozwalająca rejestrować dany zakres fali,
- ❖ relatywnie proste stworzenie urządzenia rejestrującego odbicia – kamery.

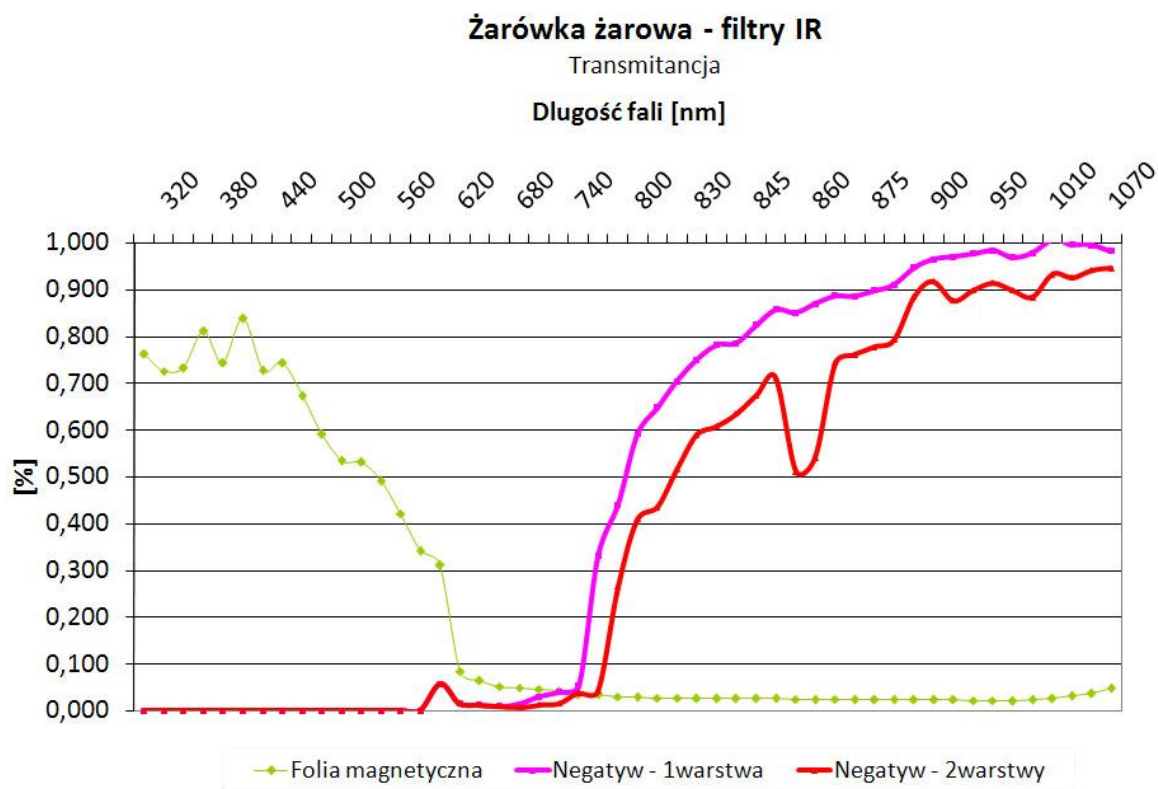
Należy uważać, by natężenie promieniowania nie było zbyt wysokie, aby zminimalizować prawdopodobieństwo uszkodzenia rogówki oka osoby użytkującej system. Więcej informacji na ten temat zawarte jest w polskich normach dotyczących pracy z laserami [17].

Ważnym aspektem przy wyborze źródła oświetlenia była czułość kamery na dane pasmo promieniowania. Zostały przeprowadzone badania z użyciem prostych filtrów: negatywu kliszy fotograficznej oraz folii magnetycznej z dyskietki komputerowej 5 i 1/4 cala. Przebieg badania zilustrowano na rys.3.10.

Źródłem promieniowania była żarówka żarowa. Strumień światła przechodząc przez specjalnie przygotowany kanał tak, by do przetwornika nie dotarły inne fale, trafiał na badany filtr. Zabieg ten służył odcięciu niepotrzebnych składowych widma promieniowania. Otrzymane wyniki przedstawione zostały na wyk. 1.



**Rys. 3.6. Badanie filtrów**



**Wykres 3.1. Pomiar charakterystyk filtrów w paśmie widzialnym i bliskiej podczerwieni**

Z uzyskanych pomiarów wynika, że nie ma potrzeby używania dedykowanych filtrów, gdyż nie potrzebujemy odcięcia całego pasma widzialnego. Jedna warstwa negatywu kliszy fotograficznej w pełni wystarcza do zastosowań w systemie.

## **4. Założenia projektowe**

W niniejszym rozdziale opisano cel pracy oraz podstawowe założenia sprzętowe. Zwrócono uwagę na odpowiednie parametry tworzonego stanowiska.

### **4.1 Cel**

Zakłada się, że w ramach pracy dyplomowej zostanie zrealizowane prototypowe stanowisko pomiarowe, służące śledzeniu punktu fiksacji wzroku na monitorze komputera. Głównymi składowymi systemu będzie kamera z odpowiednim filtrem czułym na bliską podczerwień, źródeł oświetlenia IR oraz monitor LCD. Cały system oprogramowany będzie przy pomocy środowiska C++, w sposób możliwie oszczędny wydajnościowo. Szczegółowe informacje znajdują się w kolejnym rozdziale.

### **4.2 Założenia sprzętowe**

#### **Kamera**

Podstawowym założeniem jest wykorzystanie powszechnie dostępnej kamery internetowej, o rozdzielczości co najmniej 720lini, nie posiadającej w sobie filtra odcinającego pasmo podczerwone. Ewentualnym rozwiązaniem jest, usunięcie takiego filtra. Do kamery montowany będzie nowy filtr przepuszczający pasmo bliskiej podczerwieni, zwłaszcza w okolicach promieniowania użytych diod  $\sim 850\text{nm}$ .

#### **Diody**

Używane diody powinny promieniować z odpowiednią mocą, tak aby nie stanowić zagrożenia dla osoby badanej, zgodnie z polskimi normami dla laserów klasy 1 lub 1M, a jednocześnie na tyle mocno, by odpowiednio oświetlić oko. Maksymalna dopuszczalna ekspozycja żywej tkanki – szczególnie czułego oka – nie może zostać przekroczona. Dodatkowo kąt promieniowania wybranych diod musi zapewniać dobre oświetlenie oka, nawet w sytuacji odchylenia głowy w bok.



Stanowisko komputerowe

Zapewnione musi zostać stanowisko wyposażone w monitor LCD, USB 2.0 oraz odpowiedniej klasy jednostkę obliczeniową typu PC z systemem operacyjnym Windows. Minimalne wymagania sprzętowe: Intel Core duo / Athlon x2, 1Gb Ram, 100mb HDD

### **4.3 Budowa stanowiska i kalibracja systemu**

Położenie obserwowanych odbić na powierzchni rogówki nie ulega zmianie przy ruchach oka; niestety w momencie, gdy użytkownik poruszy całą głowę, ich położenie zmienia się. Stąd, by zniwelować efekty wykonywanych ruchów stosuje się określone wartości korekcyjne, w celu poprawy dokładności systemu. Parametry przekształcenia definiowane są w procesie kalibracji lub w procesie akwizycji obrazu.

Odpowiednie wartości kalibracyjne potrzebne są również ze względu na krzywizny płaszczyzny oka. Powierzchnia oka nie jest płaska, stąd w procesie kalibracji systemu należy bezwarunkowo pamiętać o uwzględnieniu tego faktu. Kalibracja systemu jest również potrzebna choćby z samego faktu wprowadzenia szerokości i wysokości ekranu monitora. Jest to najczęściej operacja automatyczna, pobierana na podstawie rozdzielczości monitora.

Stanowisko natomiast powinno być sporządzone wg pewnych określonych zasad. Niespełnienie zaleceń może znacznie wpłynąć na dokładność systemu. System zbudowany jest z 4 diod umieszczonych na monitorze, w wersji roboczej przyklejanych na przylepcu opasającym krawędzie monitora. Kamera powinna być ustawiona pod monitorem w niedalekiej jego odległości, najlepiej w połowie jego szerokości. Zalecana odległość od monitora to ~70cm. Osoba badania nie może siedzieć dalej lub bliżej od podanej wartości - w odchyleniu większym niż 15cm. Większa ilość informacji na temat prototypowego stanowiska znajduje się w rozdziale 6.

## 5. Symulacje

W fazie początkowej zdecydowano się na przeprowadzenie eksperymentów związanych z systemem do śledzenia punktu fiksacji wzroku. Wybrano najefektywniejsze algorytmy spośród możliwych, zamodelowano w środowisku Matlab, poddano modyfikacjom, po czym weryfikacji. W niniejszej części opisano kolejno ważniejsze zagadnienia, związane z tego typu systemami, oraz udokumentowano ich skuteczność. Założeniem tej części pracy było przełożenie doświadczeń i wniosków, na kolejne etapy powstawania prototypowego stanowiska śledzenia punktu fiksacji wzroku na monitorze komputera.

### 5.1 Algorytm przetwarzania obrazu

Po akwizycji obrazu z kamery, bez względu na zastosowaną, opisaną powyżej metodę, otrzymujemy ciąg klatek. Każde kolejne dwie przedstawiają na przemian obraz z oświetloną źrenicą – tzw. „bright eye” oraz obraz z czterema glintami, widocznymi jako rozłączne punkty na źrenicy. Widzimy to na rys. 5.1. Na podstawie drugiego z punktów wyznaczamy położenie glintów, które w dalszej kolejności służy nam do określenia punktu fiksacji wzroku. Dzięki użyciu czterech źródeł LED na narożnikach monitora, na powierzchni oka dostajemy również cztery odbicia, tworzące wielokąt – punkt fiksacji wzorku wypada zawsze wewnątrz powstałej figury. Użycie takiej ilości w źródeł podczerwieni, rozmieszczonych w odpowiedni sposób, pozwala na uniezależnienie systemu od ruchów głowy.



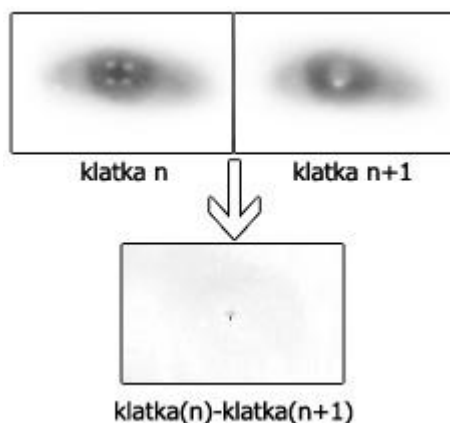
obraz z 'bright eye'



obraz z 'dark eye'

Rys. 5.1 Dwie kolejne klatki zarejestrowane kamerą

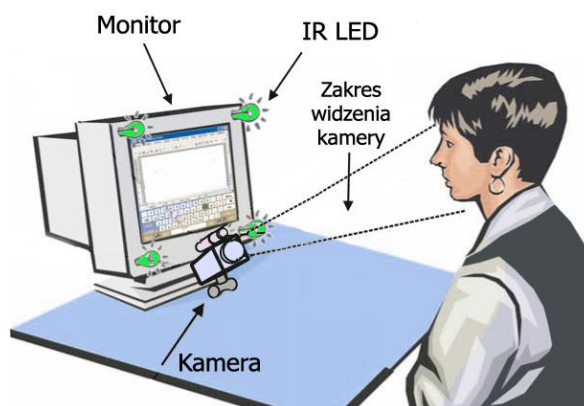
Odejmując od siebie poszczególne klatki, zgodnie z rys. 5.2, otrzymujemy obraz różnicowy, dzięki któremu jesteśmy w stanie możliwie dokładnie wyznaczyć środek źrenicy. Warto tu podkreślić, że jest to najbardziej newralgiczny moment. Nawet stosunkowo mały błąd przy wyznaczaniu środka źrenicy powoduje przekłamanie wyników.



Rys. 5.2 Uproszczony schemat powstawania obrazu różnicowego

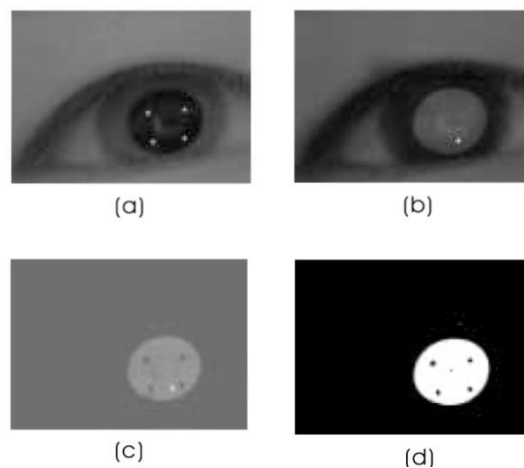
### 5.1.1. Opis algorytmu

Cztery z pięciu źródeł IR, umieszczone są dokładnie na narożnikach ekranu. Dzięki nim uzyskujemy odbicia na powierzchni oka - glinty. Piąte natomiast znajduje się jak najbliżej osi kamery i służy do uzyskania tzw. jasnego oka (z ang. 'bright eye' effect). Źródła światła są na przemian włączane i wyłączane, tworząc 5 glintów na powierzchni oka. Na podstawie odbić oraz wyznaczeniu środka źrenicy zostaje wyznaczony punkt fiksacji wzroku [3].



Rys. 5.3 Budowa stanowiska [4]

Używana kamera ma za zadanie rejestrować obraz uzyskany na powierzchni oka. W tak odbieranym obrazie widoczne są odbicia - glinty z 4 źródeł LED umieszczonych na narożnikach monitora – rys. 5.4(a), oraz tzw. jasna źrenica wraz z widocznym quasi-glintonem, pochodzącym od źródła oświetlenia umieszczonego na osi kamery – rys. 5.4 (b). Dokonując prostej operacji matematycznej, dostajemy obraz różnicowy widoczny na rys. 5.4 (c), który następnie po wstępnym progowaniu, przedstawiany jest jako obraz binarny rys. 5.4 (d).



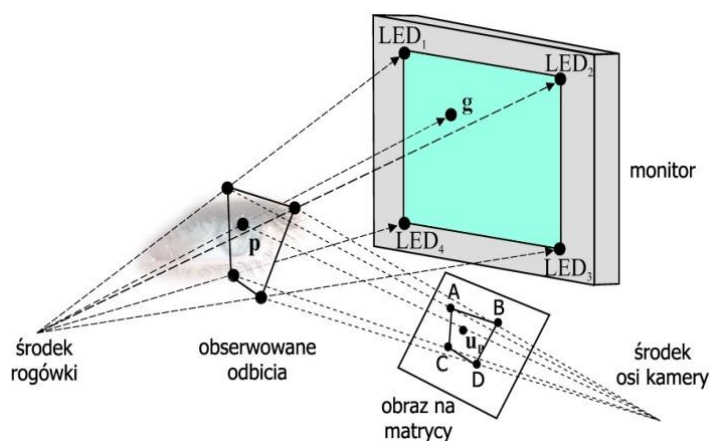
**Rys. 5.4. Obraz rejestrowany przez kamerę; a-ciemna źrenica, b-jasna źrenica, c-obraz różnicowy, d – obraz różnicowy binarny, z punktem oznaczającym środek źrenicy [4].**

Niestety zdarza się tak, że w zakwizowanym obrazie glinty wychodzą poza obszar źrenicy (rys 5.5). Jednak dzięki modyfikacjom algorytmu opisywanego w artykule z IEEE na temat bezinwazyjnych systemów śledzenia punktu fiksacji wzroku, proponowany przez nas system jest nieczuły na tego typu sytuacje [13].



**Rys. 5.5. Możliwe nieprawidłowości [13]**

Punkt fiksacji osoby badanej jest zawsze w wielokącie tworzonym przez uzyskane z odbić punkty referencyjne – A, B, C, D, zgodnie z rys 5.6.



**Rys. 5.6. Schemat projekcji systemu 5LED [4]**

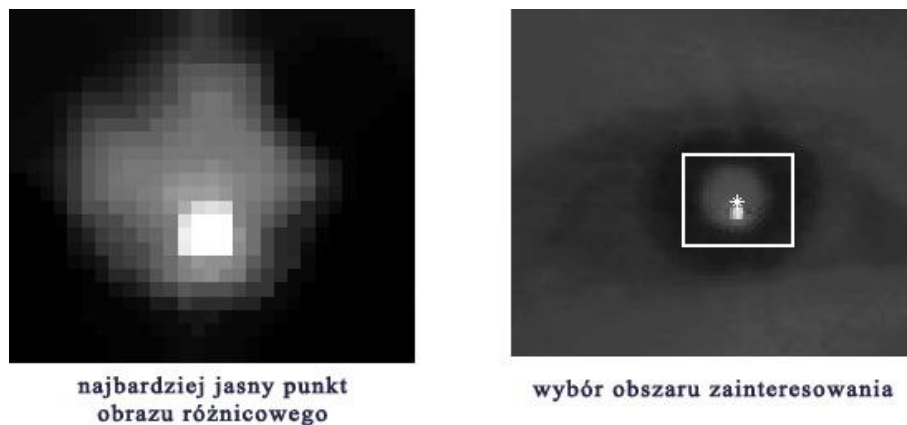
Zatem, po etapie akwizycji obrazu i zastosowaniu odpowiednich algorytmów przetwarzania obrazu, uzyskano dwa obrazy bazowe – obraz różnicowy oraz obraz z czterema glintami. Na ich podstawie bazują opisane poniżej algorytmy śledzenia punktu fiksacji wzroku.

### **5.1.2. Wyznaczenie obszaru zainteresowania**

W celu usprawnienia operacji wyznaczania środka źrenicy oraz glintów, należy zawęzić obszar poszukiwań. W tym celu wyznacza się obszar, w którym znajduje się oko; najlepiej to bardziej oświetlone oraz z mniejszą ilością artefaktów. Znanych jest wiele metod, my skupimy się na dwóch z nich.

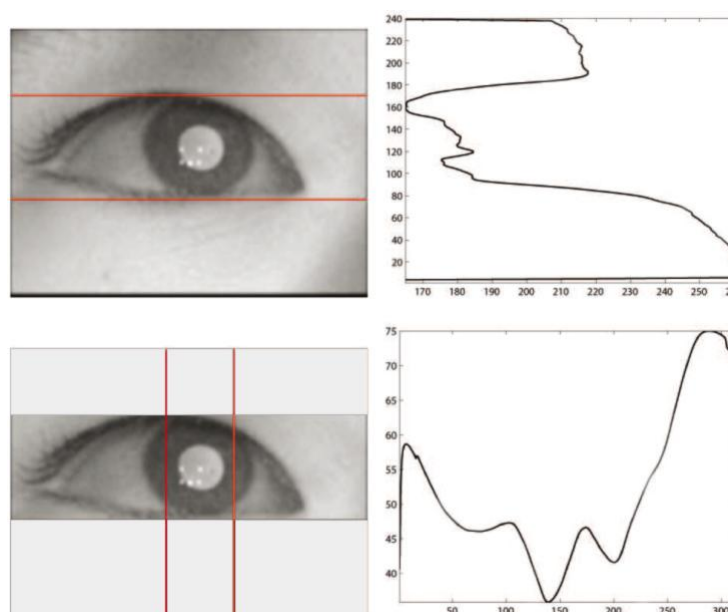
Stosowana przez nas metoda polega na wykryciu w obrazie „bright Ele” najjaśniejszego punktu, po czym zakreśleniu obszaru prostokątem o środku zbliżonym do znalezionej punktu. W ten sposób dostajemy pewien obszar zainteresowania, w którym znajduje się źrenica jak i wszystkie odbicia na powierzchni oka od używanych źródeł IR LED. Sposób ten rozwiązuje od razu spór o to, które oko należy obserwować. Bierzemy pod uwagę bardziej oświetlone oko, czyli to, w którym odbicia będą silniejsze, a więc mniejsze ryzyko błędnego wykrycia glintów przy dużym nagromadzeniu artefaktów. Proces wyznaczania obszaru zainteresowania, tzw. ROI, widoczny jest na rys. 5.7. Należy tu podkreślić, że obszary zainteresowania w przypadku wykrywania czterech glinów głównych w obrazie ‘dark eye’, oraz quasi-glintu w obrazie ‘dark eye’ będą inne, jednakże punkt zaczepienia jest ten sam. Dzieje się tak, ponieważ w większym obszarze zainteresowania, w którym poszukiwany jest środek źrenicy, znajduje się większa ilość

odbić pochodzących z zewnątrz. Stąd, by zminimalizować zakłócenia ze strony innych refleksów, niebędących odbiciami używanych źródeł LED IR, zawęża się obszar poszukiwań w obrazie ‘dark eye’.

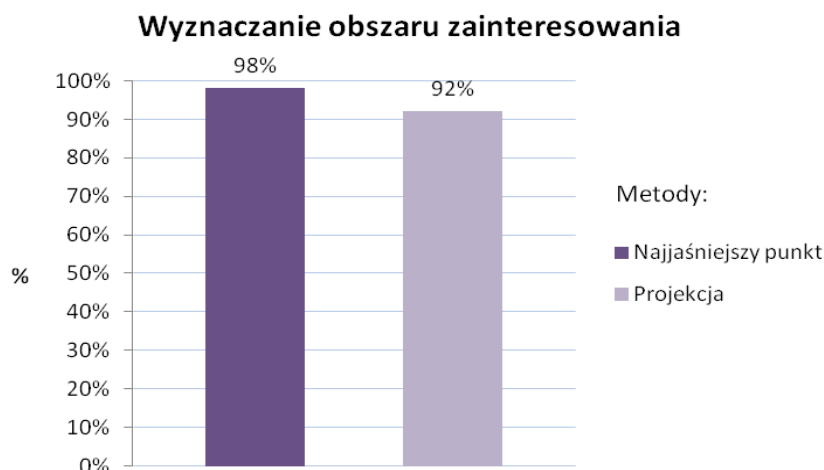


**Rys. 5.7. wykrywanie najjaśniejszego punktu obrazu różnicowego**

Istnieje jeszcze jedna, dość popularna metoda wyznaczania obszaru zainteresowania. Jest niestety nieco wolniejsza w swym działaniu od opisanej powyżej. Polega na rzutowaniu pionowym i poziomym wszystkich pikseli obrazu na prostą. Sumujemy wszystkie piksele w każdym wierszu i oddzielnie w każdej kolumnie. Dzięki tej operacji dostajemy obraz zagęszczenia pikseli o dużej ilości bieli lub czerni w poszczególnych wierszach i kolumnach, widoczne na rys 5.8. Na podstawie punktów przegięcia, odpowiednich maksimów i minimów, jesteśmy w stanie wyznaczyć obszar, w którym znajduje się źrenica czy tęczówka.



**Rys. 5.8 Vertical and Horizontal Projection [3]**



**Wykres 5.1. Wyznaczanie ROI**

Na podstawie badań, patrz wykres 5.1, stwierdzono iż metoda oparta o najjaśniejszy punkt jest skuteczniejsza i szybsza w swoim działaniu. Niestety w momencie, gdy warunki pomiarowe przestają być optymalne skuteczność tej metody maleje.

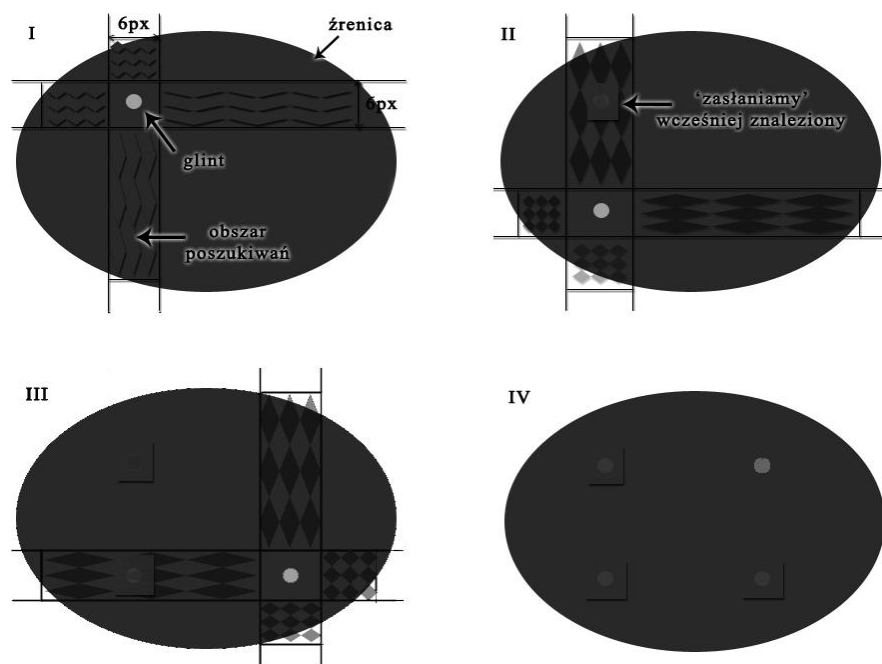
### 5.1.3. Wykrywanie glintów

Po wyznaczeniu obszaru zainteresowania, przychodzi czas na wykrycie, opisanie i uszeregowanie punktów powstałych przez odbicie źródeł IR na powierzchni oka.

W zaznaczonym wcześniej obszarze ‘dark eye’, wyszukiwany jest najjaśniejszy punkt. Należy zwrócić uwagę czy w analizowanym obrazie nie ma znaczących pozostałości po quasi-glincie. Punkt ten oznaczany jest jako pierwszy glint. Proces wyszukiwania kolejnych jest nieco bardziej skomplikowany. Niestety często się zdarza, że w analizowanym obszarze znajdują się artefakty, bądź fragment powierzchni skóry, bardziej oświetlone od niektórych z glintów. Aby temu zapobiec, stosuje się nowatorską technikę wykrywania glintów w kolejno wyznaczanych obszarach. Przy wyjaśnianiu metody przydatny będzie rysunek pomocniczy, patrz rys. 5.9. Dodatkowo, wyszukiwane są glinty będące w bliskim sąsiedztwie źrenicy, co daje bardzo dobre efekty w przypadku pojawiania się dodatkowych odbić na białku oka. W takim przypadku algorytm ignoruje ten obszar, gdyż jest on położony w znacznej odległości od źrenicy oka.

W metodzie tej występuje kilka etapów. Pierwszym z nich jest zaznaczenie pasów o szerokości 6 pikseli ( w zależności od stosowanej rozdzielczości kamery oraz soczewki, szerokość ta może się zmieniać) zgodnie z rys. 5.9, krok I. Zaznaczone „falami” piksele wewnątrz widocznych pasów, stają się obszarem zainteresowania w kolejnym kroku

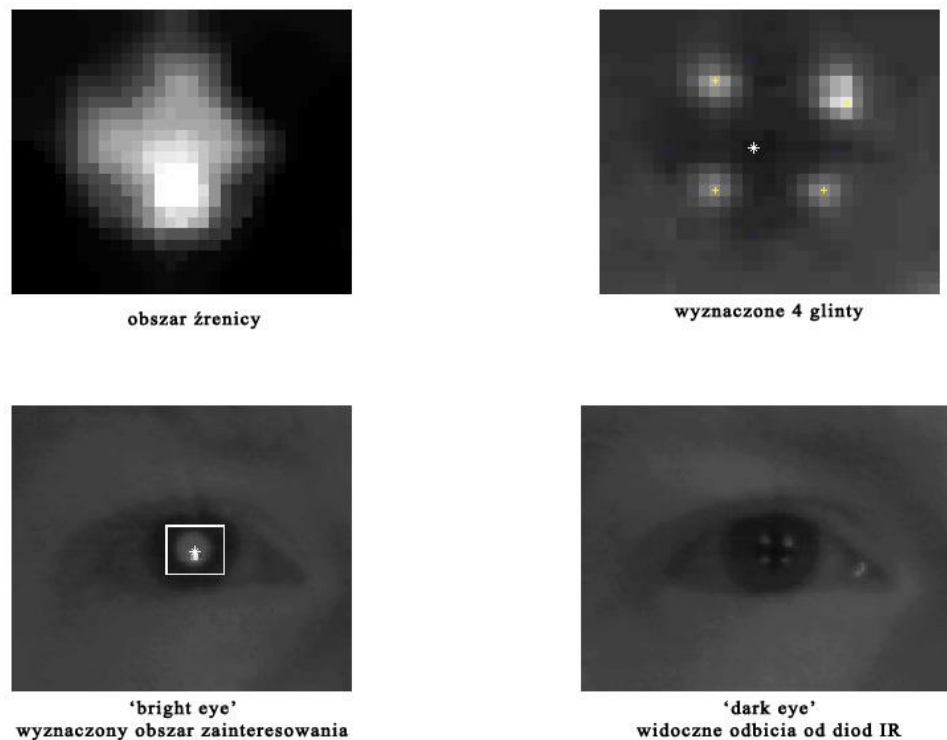
poszukiwań. Cały pozostały obszar zostaje pominięty. Po znalezieniu drugiego glinta, następuje bardzo podobna operacja, z tą różnicą, że pewien ściśle określony obszar wokół pierwszego glinta jest wymazywany tak, aby system nie wykrył jeszcze raz tego samego glinta. Zerowane jest również otoczenie aktualnie wykrywanego odbicia, gdyż nieraz najbliższa okolica znalezionego już glinta jest jaśniejsza od kolejnego szukanego. Tym sposobem przechodzimy przez kolejne kroki, by w ostatnim z nich wykryć czwarty punkt.



Rys. 5.9. Algorytm znajdowania glintów

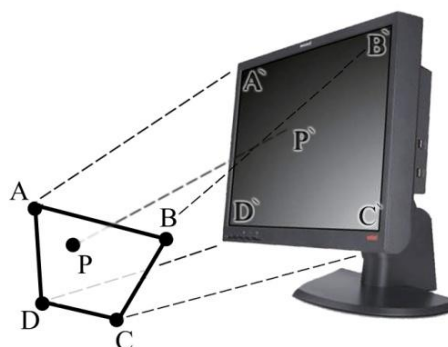
Zaletami metody jest dość duże uniezależnienie wykrywania glintów od artefaktów w okolicach żrenicy oraz bardzo duże prawdopodobieństwo, że znalezione punkty tworzą czworokąt, a więc są poszukiwanymi glintami.





**Rys. 5.10. Wyznaczanie glintów w środowisku Matlab**

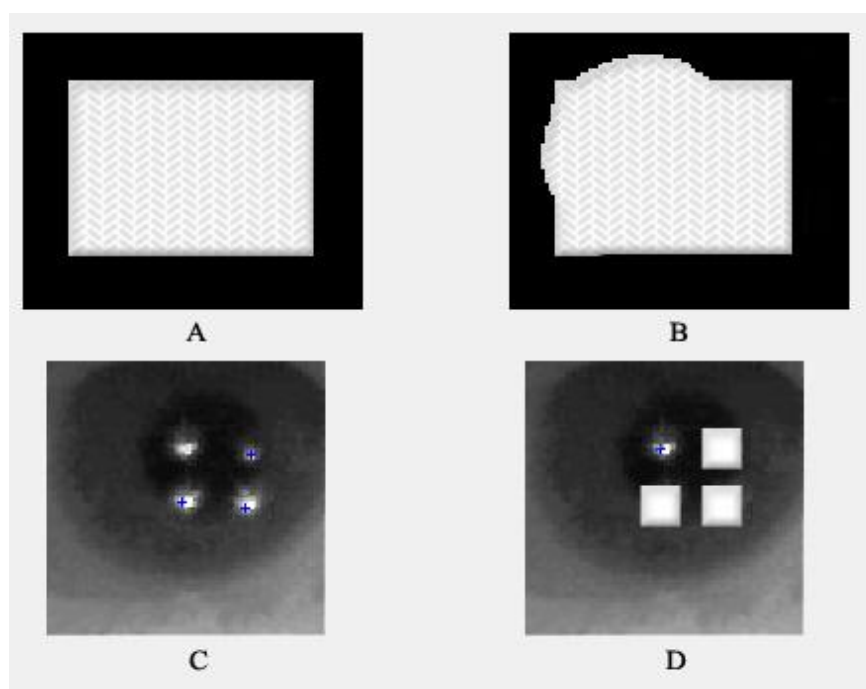
Po wyznaczeniu współrzędnych każdego glinta, następuje ich szeregowanie, zgodnie z rys.5.11. Na podstawie przyjętego oznaczenia, przyporządkowuje się każdemu z glintów odpowiednią nazwę, dzięki której interpretuje się jego pochodzenie od danego źródła IR LED. Jest to operacja konieczna w przypadku zastosowania algorytmów bazujących na zależnościach geometrycznych.



**Rys. 5.11. Zasada oznaczania glintów**

Opisana wcześniej metoda jest dość skomplikowana, a co za tym idzie wolna – skomplikowana obliczeniowo. Wprowadzono więc pewne uproszczenia, które w mało

znaczący sposób wpływały na skuteczność wykrywania glintów, natomiast bardzo upraszczały algorytm, a co za tym idzie, szybkość działania systemu. Zmodyfikowana metoda, podobnie jak poprzednia, w pierwszym kroku wyznacza obszar wewnętrzny ROI, rys. 5.12 A, następnie rozszerza ten obszar pewne otoczenie powierzchni źrenicy, rys 5.12 B. Obszar wyszukiwania glintów został dobrany na podstawie badań i eksperymentów tak, aby zminimalizować prawdopodobieństwo błędnego wykrycia glintu pochodzącego od diody LED jako mocno oświetlonego artefaktu. Kolejnym etapem jest wyszukanie w tak dobranym obszarze glintów, rys. 5.12 C, po czym w odpowiedni sposób zakrycie otoczenia już znalezionych, rys. 5.12 D. ‘Zasłaniany’ obszar musi być na tyle duży, by zakryć otoczenie wcześniej wykrytego glintu, jednocześnie umożliwiając wykrycie kolejnych. Po nałożeniu dodatkowych warunków, metoda ta daje pewność, że wykryte kolejne punkty znajdują się w obszarze tworzącym wielokąt. Jak już wcześniej wspomniano, cztery glinty tworzą zawsze tego typu figurę, w idealnym przypadku prostokąt.



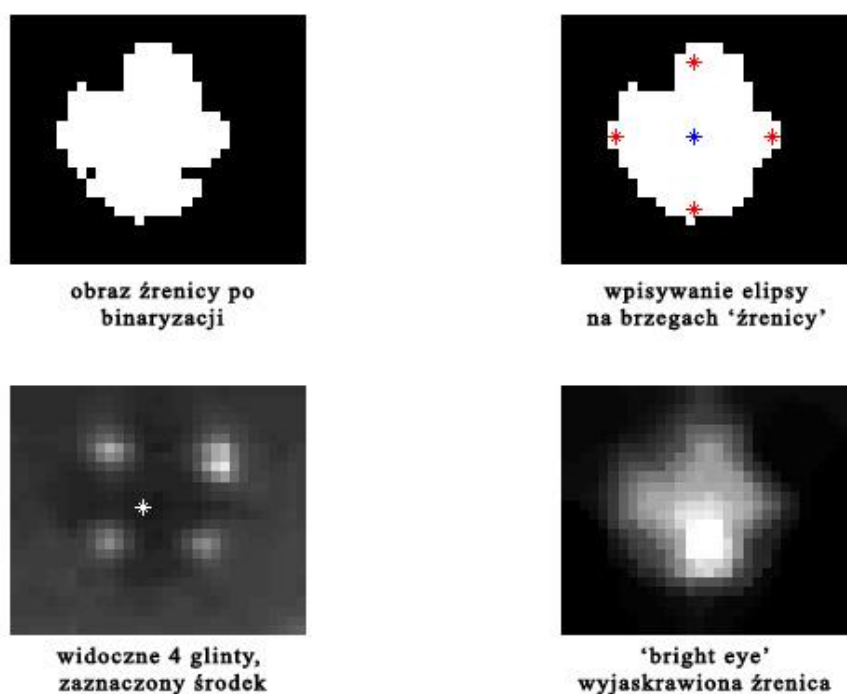
Rys. 5.12. Wyznaczanie glintów metodą uproszczoną

### 5.1.4. Wykrywanie środka źrenicy

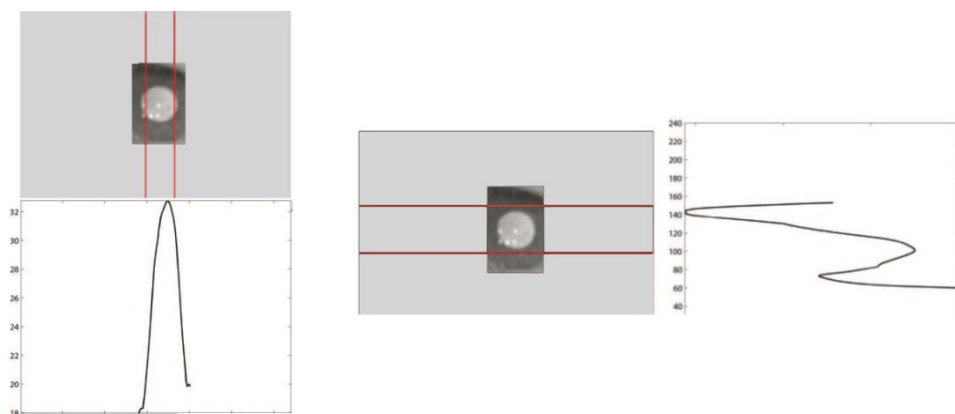
Wyznaczanie środka źrenicy jest jednym z ważniejszych punktów pracy, gdyż nawet drobne błędy pomiarowe powodują znaczne nieprawidłowości przy wyznaczaniu punktu fiksacji wzroku. Stąd też bardzo ważna jest czułość i rozdzielczość używanej kamery.

Znanych jest wiele podejść do rozwiązania problemu. W niniejszej pracy opisano trzy z nich. Pierwszym jest opisanie elipsy na punktach brzegowych źrenicy, rys. 5.2.13. Środek tak wyznaczonej figury geometrycznej, jest poszukiwanym środkiem źrenicy. Daje to dość dobre rezultaty, zwłaszcza gdy zbinaryzowany obraz posiadać będzie wiele artefaktów, lub gdy oko jest częściowo przykryte przez powiekę. Kolejnym sposobem jest użycie opisywanej już wcześniej metody, projekcji poziomej i pionowej (z ang. Horizontal and Vertical Projection). Odpowiednie maksima wyznaczają odcietą i rzędną położenia środka źrenicy (rys. 5.14).

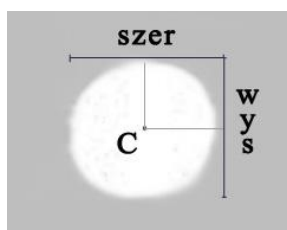
Trzecią, banalnie prostą, a jednocześnie dość skuteczną metodą jest wyznaczenie punktu środka źrenicy jako punktu w połowie szerokości i wysokości wcześniej skwantowanej źrenicy – zgodnie z rys. 5.15.



Rys. 5.13. Przykład wyznaczania środka źrenicy

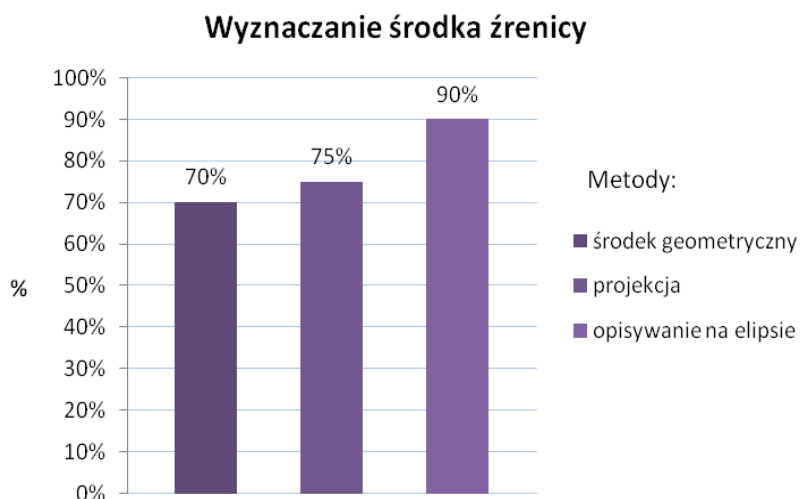


**Rys. 5.14. Vertical and Horizontal Projection [111]**



**Rys. 5.15. Rysunek poglądowy - wyznaczanie środka źrenicy**

Najlepsze efekty daje pierwszy z opisanych sposobów – przybliżanie źrenicy elipsą, zgodnie z wykresem 5.2. Jest to funkcja najmniej czuła na różnego typu zakłócenia, przy tym najdokładniejsza.



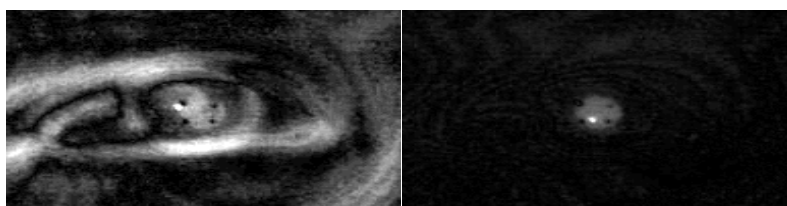
**Wykres 5.2. Porównanie metod wyznaczania środka źrenicy**

W momencie wystąpienia dużej ilości artefaktów w pobliżu źrenicy, czy w związku z nieprawidłowym oświetleniem – co przekłada się na nieprawidłową operację binaryzacji – środek źrenicy wykrywany jest na ogół prawidłowo, zwłaszcza w

porównaniu z innymi metodami. Po przeprowadzeniu wielu niezbędnych symulacji z użyciem różnych metod, w finalnym rozwiązaniu zdecydowano się na stosowanie opisywanej metody.

### 5.1.5. Algorytm korekcji przesunięć

Ruchy użytkownika powodują przesunięcia kolejnych ramek względem siebie, co ma negatywne przełożenie przy tworzeniu obrazu różnicowego, widoczne na rys. 5.16. Przekłada się to na nieprawidłowe współrzędne środka źrenicy – najbardziej newralgiczny punkt systemu. Przy prawidłowym wykryciu środka źrenicy, jeśli źrenica z klatki na klatkę zostanie zarejestrowana w innej pozycji względem najjaśniejszego punktu na obrazie, nastąpią dość znaczne błędy. W wielu komercyjnych systemach do tej pory stosowane jest nieprawidłowe założenie, że pozycja źrenicy na przestrzeni dwóch sąsiednich klatek się nie zmienia. Niestety, prawda jest inna, zwłaszcza w systemach operujących małą rozdzielczością czasową. Żeby temu zapobiec stosowane są autorskie algorytmy korekcji przesunięć.

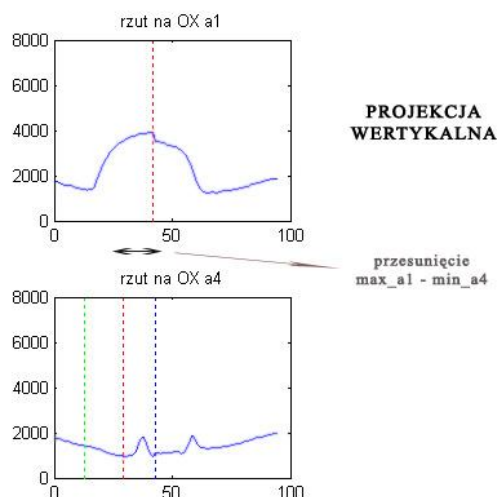


Rys. 5.16 Błędy związane z obrazem różnicowym

Jednym z proponowanych rozwiązań jest korekcja przesunięć oparta o projekcje wertykalną. Polega ona na rzutowaniu – sumowaniu wszystkich pikseli w każdej z linii na OX. Na podstawie wartości z każdej kolumny, jesteśmy w stanie rozpoznać, czy powieka zakryła oko i możemy bez większych problemów wykryć punkty charakterystyczne na powierzchni oka. Projekcja w tym przypadku służy nam do porównania skrajnych wartości obrazu. Na podstawie różnicy wartości maksymalnej jednej z klatek i wartości minimalnej kolejnej klatki, jesteśmy w stanie wyznaczyć przesunięcie środka źrenicy z dość dobrym rezultatem.

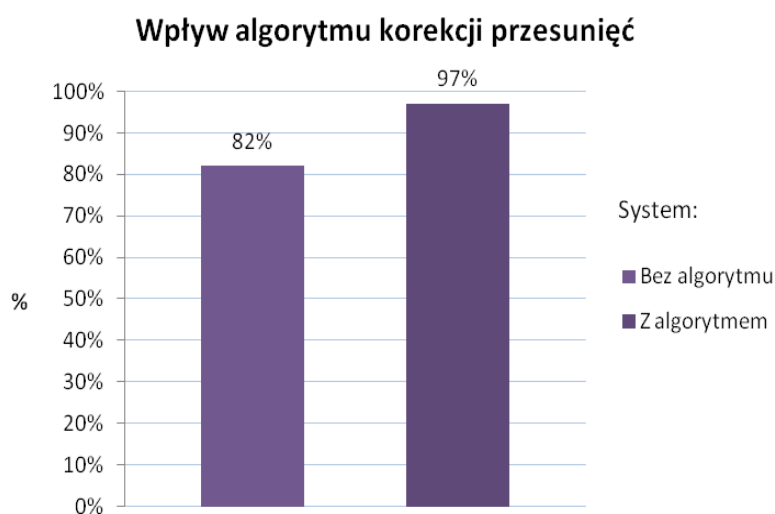
Dzięki wielu symulacjom i późniejszym badaniom udało się ustalić charakterystyczne wartości rzutu na OX obrazu ‘bright eye’ oraz ‘dark eye’. Ustalono, że gdy maksimum jednego rzutowania znajduje się w podobnym położeniu z minimum

kolejnego rzutowania, można zaniedbać obliczanie przesunięcia. Jeżeli nawet źrenica się przesunęła nie wprowadzi to znacznych błędów. W systemie wychodzi się z założenia, że im mniej ingerencji z zewnątrz w dane, tym lepiej. Niestety, są takie momenty, w których system musi zareagować. I tak, gdy maksimum obrazu ‘bright eye’ znajduje się w okolicach maksimum obrazu ‘dark eye’ (tym razem nie minimum), oznacza to, że nastąpiło znaczne przesunięcie środka źrenicy. Należy skorygować wynik o wartość równą różnicy maksimum pierwszej i minimum drugiej ramki.



**Rys. 5.17. Wykorzystanie projekcji wertykalnej w korekcji przesunięć**

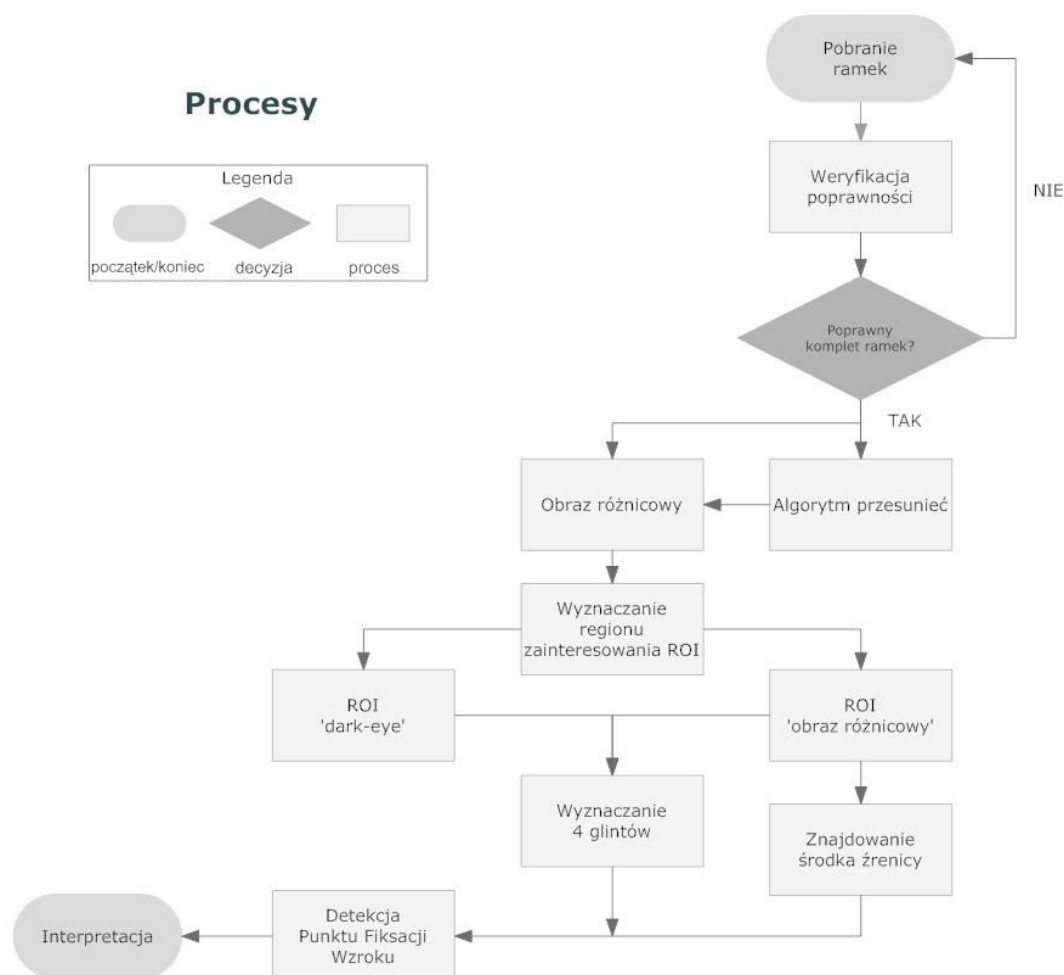
Zastosowanie w systemie autorskiego algorytmu korekcji przesunięć, dało znaczną poprawę działania algorytmu – wyznaczania punktu fiksacji. Algorytm został przetestowany w idealnych warunkach pomiarowych, należy brać pod uwagę jego słabszą skuteczność w mniej sprzyjających warunkach. Na wykresie 5.3 przedstawiono skuteczność jego działania.



**Wykres 5.3. Zastosowanie algorytmu korekcji przesunięć przy wyznaczaniu punktu fiksacji wzroku**

### 5.1.6. Implementacja algorytmu w środowisku Matlab

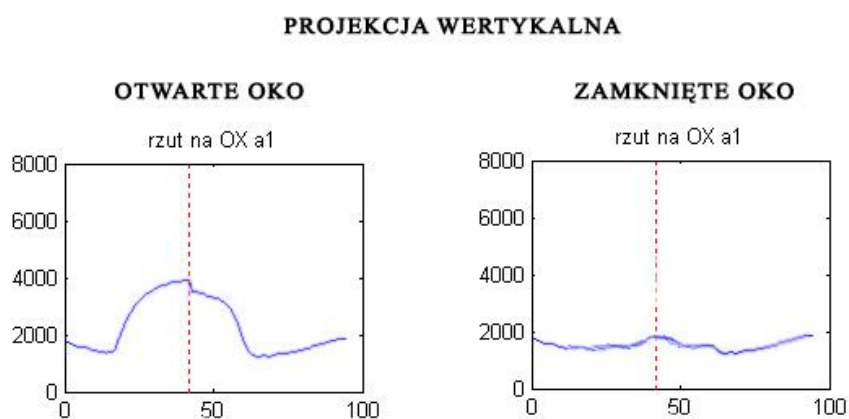
Poniżej znajduje się schemat blokowy algorytmu przetwarzania obrazu w środowisku Matlab. Opis kolejnych etapów przetwarzania obrazu znajduje się w kolejnych rozdziałach.



Rys. 5.18. Algorytm przetwarzania obrazu

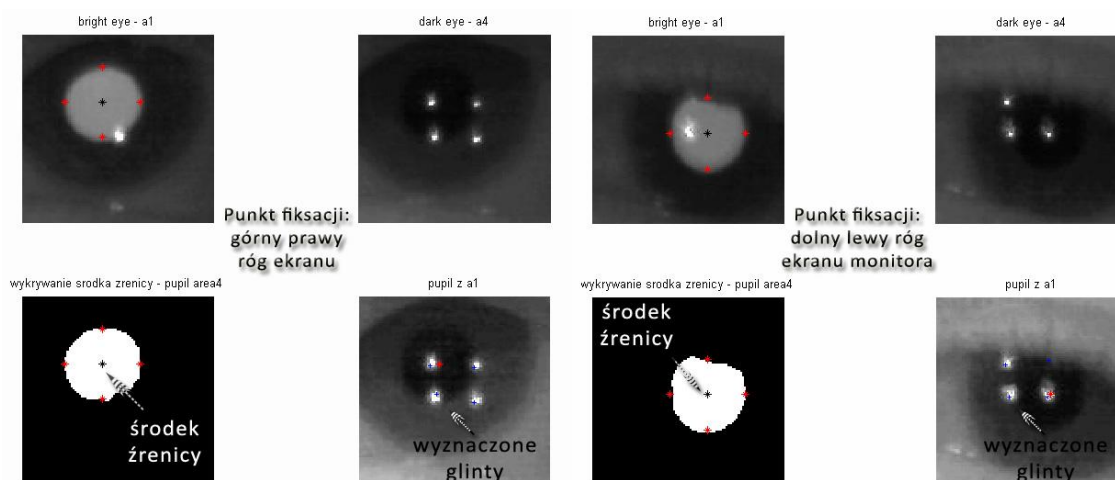
W środowisku Matlab, dzięki wbudowanym funkcjom, w dość prosty sposób zaimplementowano wiele z opisywanych niżej algorytmów. Jeżeli we wstępnej fazie przetwarzania obrazu, na podstawie projekcji wertykalnej – rzutowania odpowiednich punktów na OX – nie stwierdzono przymknięcia powieki, następują kolejne etapy algorytmu przetwarzania obrazu, zgodnie z rys. 5.18. Decyzja o poprawności kompletu ramek opiera się na porównaniu wartości maksymalnej w stosunku do wartości minimalnej rzutu. Jeżeli różnica powyższych wartości jest mała oraz gdy średni poziom jasności regionu zainteresowania jest odpowiednio duży, następuje stwierdzenie o nieprawidłowościach w zarejestrowanych ramkach. Powodem tego jest najczęściej

przymknięcie powieki, na tyle duże, by zakłócić prawidłową pracę systemu. Rysunek 5.19 przedstawia projekcję wertykalną oka z otwartą i przymkniętą źrenicą. Jeżeli nastąpi wykrycie nieprawidłowości w obrazie, użytkownik jest o tym poinformowany krótkim sygnałem dźwiękowym.



**Rys. 5.19. Projekcja wertykalna – wykrywanie przymknięcia oka**

Na rys. 5.20, przedstawiono interpretację graficzną algorytmu przetwarzania obrazu na podstawie dwóch par ramek. Po lewej stronie widzimy prawidłowy obraz ‘bright eye’ oraz ‘dark eye’, na podstawie których po binaryzacji wykrywany jest środek źrenicy oraz pozycja czterech glintów. Po prawej stronie widać, że jeden z czterech glintów nie został prawidłowo zarejestrowany przez kamerę. Zastosowanie odpowiedniej korekcji wyznaczania pozycji czwartego odbicia, pozwala na bezbłędną interpretację takiego obrazu. W przypadku niewidoczności większej ilości glintów, algorytm niestety nie jest w stanie prawidłowo zadziałać. Dlatego też ramki, w których glinty nie zostały prawidłowo zarejestrowane, są odrzucane.



**Rys. 5.20. Interpretacja graficzna działania algorytmu przetwarzania obrazu**



## **5.2. Detekcja punktu fiksacji wzroku**

Po przetworzeniu obrazu uzyskanego z kamer oraz ich analizie, przychodzi moment na wyznaczenie szukanego punktu fiksacji wzroku. Nie jest to rzecz prosta, gdyż tak do końca nigdy nie będzie wiadomo, gdzie w danej chwili ktoś patrzy. Udaje się jednak wyznaczyć pewne punkty składowe toru, za którym podąża wzrok. Na ich podstawie możemy z dość dobrym przybliżeniem określić, w które miejsce na monitorze komputera dana osoba się wpatruje.

### **5.2.1. Proponowane algorytmy**

Do uzyskania punktu fiksacji wzroku może prowadzić wiele dróg. Poniżej opisano dwie z nich, przy czym dwie pierwsze zostały dokładnie przeanalizowane w środowisku Matlab, kolejne dwie w środowisku C++ - opis w kolejnym rozdziale. Opierają się one o dane utworzone przy przetwarzaniu obrazu. Wszystkie z nich prowadzą do uzyskania szukanego punktu, ale każda z nich obarczona jest pewnymi niedoskonałościami. Różnią się od siebie dokładnością, stopniem trudności implementacji oraz szybkością działania. Na etapie symulacji zdecydowano się rozwijać przede wszystkim metodę wirtualnych punktów, jako metodę szeroko propagowaną w tego typu systemach. Niestety w połączeniu z proponowanym prototypowym stanowiskiem nie sprawdziła się.

#### **5.2.1.1 Algorytm wirtualnych punktów – linii**

Metoda ta upraszcza znacznie obliczenia związane z wyliczaniem geometrycznych zależności pomiędzy okiem, kamerą i monitorem. Oko nie jest idealnie płaską płaszczyzną, co należy uwzględnić przy tworzeniu algorytmów. Korzysta się z zależności położenia odbić promieni LED na powierzchni tęczówki i środka źrenicy w wielokątach a ich odzwierciedleniami na ekranie.

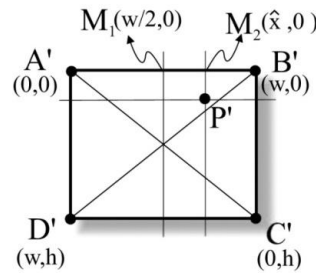


A,B,C,D – kolejne gliny, zarejestrowane przez kamera na podstawie obserwowanych na powierzchni oka ludzkiego punktów referencyjnych  $V_1, V_2, V_3, V_4$ ,

$M_{1,2,3,4}$  – punkty tworzone przez proste przechodzące przez odpowiednie punkty zbiegu oraz wcześniej wyznaczone punkty E i P,

$x_g, y_g$  – współrzędne punktu fiksacji wzroku.

Po wyznaczeniu glintów, należy wyznaczyć punkty E i P oraz dwa punkty zbiegu (tzw. vashing point). Na podstawie tych punktów wyznacza się dodatkowe punkty charakterystyczne  $M_1, M_2, M_3, M_4$  – patrz rys. 5.2.



**Rys. 5.2. Wyznaczanie punktów charakterystycznych [4]**

Należy sobie przypomnieć odpowiednie wzory.

Równanie prostej przechodzącej przez dwa punkty  $A(x_1, y_1)$  i  $B(x_2, y_2)$ :

$$Y_{AB} = \frac{(Y_B - Y_A)}{(X_B - X_A)} \cdot X + \left[ Y_A - \frac{(Y_B - Y_A)}{(X_B - X_A)} \cdot X_A \right] \quad \text{Równanie 3.3}$$

I tak przykładowo, aby wyznaczyć punkt  $M_2(X_{M2}, Y_{M2})$ , jako punkt przecięcia się prostych AB i  $PV_{PD}$  (prostej przechodzącej przez środek źrenicy i dolny punkt zbiegu – wyznaczamy analogicznie jak  $Y_{AB}$ ), należy rozwiązać poniższe równania:

$$X_{M2} = \frac{\left( Y_A - X_A \cdot \frac{(Y_B - Y_A)}{(X_B - X_A)} \right) - \left( Y_P - X_P \cdot \frac{(Y_{VPD} - Y_P)}{(X_{VPD} - X_P)} \right)}{\frac{(Y_{VPD} - Y_P)}{(X_{VPD} - X_P)} - \frac{(Y_B - Y_A)}{(X_B - X_A)}} \quad \text{Równanie 3.4}$$

$$Y_{M2} = \frac{(Y_{VPD} - Y_P)}{(X_{VPD} - X_P)} \cdot X_{M2} + \left( Y_P - X_P \cdot \frac{(Y_{VPD} - Y_P)}{(X_{VPD} - X_P)} \right) \quad \text{Równanie 3.5}$$

Podobnie należy postępować z wyznaczeniem reszty punktów, potrzebnych w kolejnych krokach.

W celu wyliczenia punktu fiksacji wzroku na monitorze komputera, należy postępować zgodnie z niżej opisanymi równaniami. By obliczyć współrzędną odciętą należy rozwiązać równanie 3.6 i kolejne, kończąc na równaniu 3.8.

Na początku należy wyliczyć stosunek punktów  $M_1, M_2, A, B$ :

$$CRx = \frac{(x_1 y_2 - x_2 y_1)(x_3 y_4 - x_4 y_3)}{(x_1 y_3 - x_3 y_1)(x_2 y_4 - x_4 y_2)} \quad \text{Równanie 3.6}$$

W podobny sposób wyliczamy, stosunek wymiarów ekranu:

$$CR_x = \frac{\left(\frac{w-w'}{2}\right)xg}{(w-xg)\frac{w}{2}} = \frac{xg}{w-xg} \quad \text{Równanie 3.7}$$

Ponieważ oba stosunki są równe, otrzymujemy:

$$xg = \frac{w \cdot CR_x}{1 + CR_x} \quad \text{Równanie 3.8}$$

co stanowi współrzędną odciętą punktu fiksacji wzroku na monitorze.

Analogicznie wyliczamy kolejną współrzędną:

$$yg = \frac{h \cdot CR_y}{1 + CR_y} \quad \text{Równanie 3.9}$$

Na podstawie uzyskanych pomiarów, skorygowanych wcześniej o dane uzyskane w procesie kalibracji, dostajemy współrzędne punktu fiksacji wzroku na monitorze komputera.

Dodatkowo możemy zauważyć pewne właściwości CR:

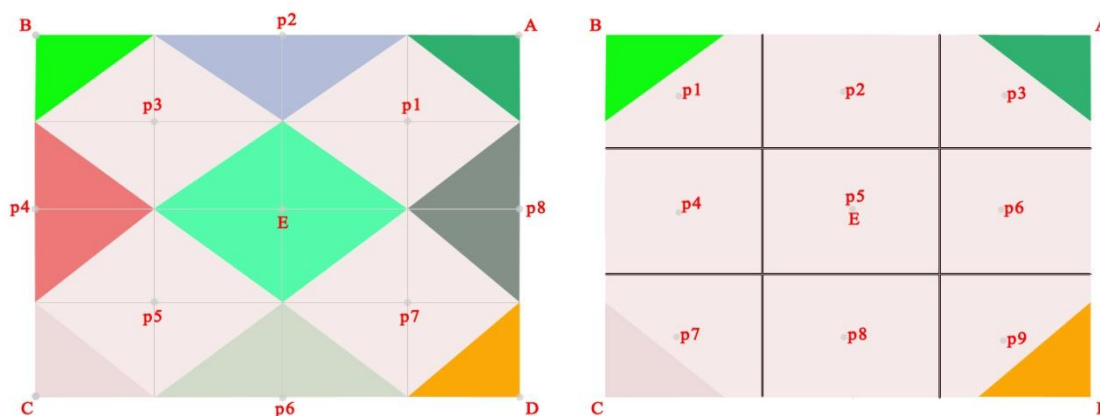
Jeżeli  $CR_x \rightarrow 0 \Rightarrow$  punkt fiksacji jest po lewej stronie ekranu

Jeżeli  $CR_x \rightarrow \infty \Rightarrow$  punkt fiksacji jest po prawej stronie ekranu

Jeżeli  $CR_x \rightarrow 0 \Rightarrow$  punkt fiksacji jest po lewej stronie ekranu

### 5.2.1.2 Algorytm odległościowy

W algorytmie tym wykorzystywane są analogiczne operacje matematyczne, co w punkcie 5.3.1.2. Metoda ta zakłada wyznaczenie punktów charakterystycznych, analizę ich położenia względem środka źrenicy, po czym wyznaczenie odpowiednich obszarów charakterystycznych – przybliżających położenie punktu fiksacji wzroku, patrz rys. 5.3.



**Rys. 5.3. Punkty i obszary charakterystyczne**  
– przypadek wyznaczania 16 pól (po lewej) oraz 9 pól (po prawej)

$A, B, C, D$  – glinty

$E$  – środek wielokąta tworzonego przez glinty

$p1-p8$  – punkty charakterystyczne

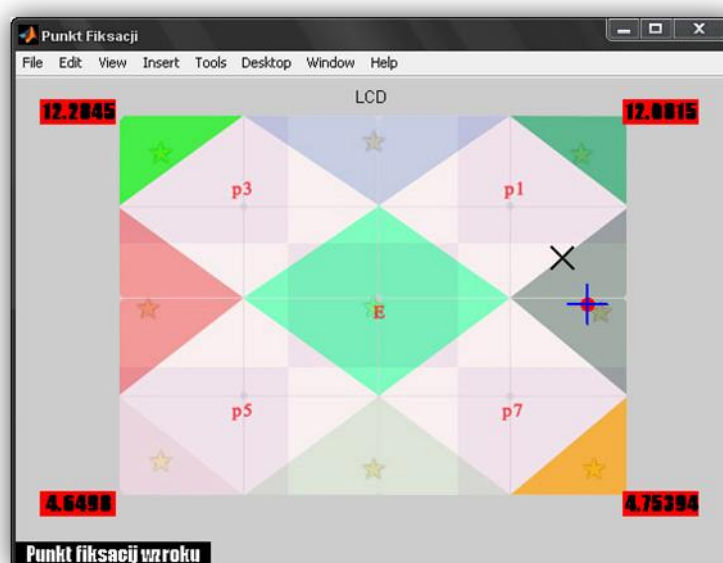
Dzięki danej metodzie możemy wyznaczyć punkt fiksacji wzroku, w idealnym przypadku z dokładnością do 32 pól. Niestety, poprzez stosunkowo niską rozdzielczość przestrzenną musimy założyć, że wykryty obszar związany z punktem fiksacji wzroku może być niepoprawnie wybrany. Dlatego też, w zależności od zastosowania systemu, postawiono za cel wykrywanie jednego z szesnastu lub jednego z dziewięciu obszarów jako obszaru położenia punktu fiksacji wzroku. Dodatkowo warto wspomnieć, że tworzony poprzez glinty wielokąt często odbiega od równoległoboku. Stąd należy stosować odpowiednie stosunki wagowe przy tworzeniu obszarów charakterystycznych (wyznaczanych na podstawie punktów charakterystycznych).

Gdy jako cel postawione zostanie przybliżenie punktu fiksacji wzroku na monitorze komputera do jedynie dziewięciu pól, stosuje się wyznaczanie dziewięciu pól charakterystycznych, patrz rys 5.3. Jeżeli odległość środka źrenicy jest najbliższa odpowiedniemu punktowi charakterystycznemu, zakładamy, że obszar zainteresowania leży wokół tego punktu. Dodatkowo sprawdzana jest odległość od poszczególnych czterech glintów, dzięki czemu możemy szybciej i dokładniej wyznaczyć poszukiwany obszar.

W przypadku konieczności dokładniejszego przybliżenia punktu fiksacji, po wyznaczeniu punktów charakterystycznych następuje porównywanie odległości położenia środka źrenicy od poszczególnych punktów charakterystycznych. Na tej

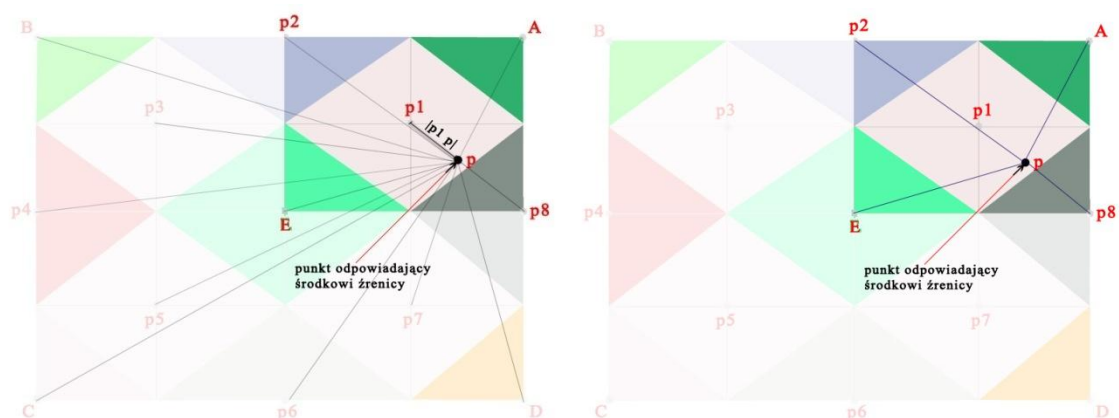
podstawie dokonuje się pierwszego przybliżenia położenia punktu fiksacji wzroku, patrz rys 5.3. W przypadku, gdy nie zostały wykryte narożniki ekranu, następuje drugie przybliżenie, na podstawie którego określa się w którym z szesnastu pól – prostokątów, leży poszukiwany punkt. W przypadku, gdy od razu zostanie wykryte najbliższe położenie do narożnika, położenie punktu fiksacji wzroku jest oczywiste.

Na rys. 5.4 pierwsza iteracja zaznaczana jest niebieskim plusem, druga dokładniejsza czarnym krzyżykiem. Zgodnie z prezentacją wyniku widać, że badana osoba patrzyła się w prawą, środkową część monitora.



**Rys. 5.4. Prezentacja wyniku działania algorytmu – przypadek wyznaczania 16 pól**

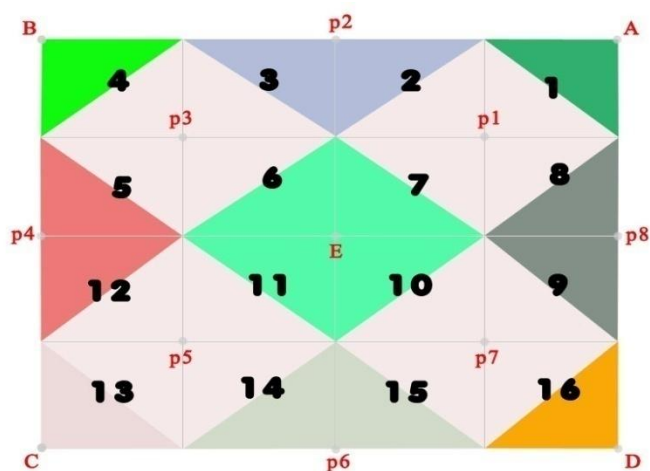
Na rys. 5.5 przedstawiono kolejne kroki postępowania przy wyznaczaniu obszaru zawierającego punkt fiksacji wzroku. W tym przypadku najpierw zostanie wykryty punkt charakterystyczny p1, ponieważ odległość punktu p – środka źrenicy, od tego punktu jest najmniejsza. Następnie po analizie odległości od punktów p2, p8, E i A zostaje wyznaczony poszukiwany obszar charakterystyczny (o narożnikach w p1 i p8).



**Rys. 5.5. Kolejne kroki postępowania przy wyznaczaniu obszaru charakterystycznego – przypadek wyznaczania 16 pól**

W algorytmie w zależności od stosowanego przybliżenia punktu fiksacji wzroku na monitorze komputera, stosuje się inne oznaczenie obszarów charakterystycznych. Nazywając odpowiednie obszary kierowano się kolejnością przeprowadzonych uprzednio próbek testowych, tak by móc zaobserwować finalny efekt w postaci wzrastającej linii trendu.

Ostatecznie, poszczególne obszary – w zależności od założonej dokładności pomiarowej – ponumerowano od 1 do 9 lub od 1 do 16, odpowiednio zgodnie z rys. 5.6 i 5.7.



**Rys. 5.6. Numeracja szesnastu pól przybliżających punkt fiksacji wzroku**

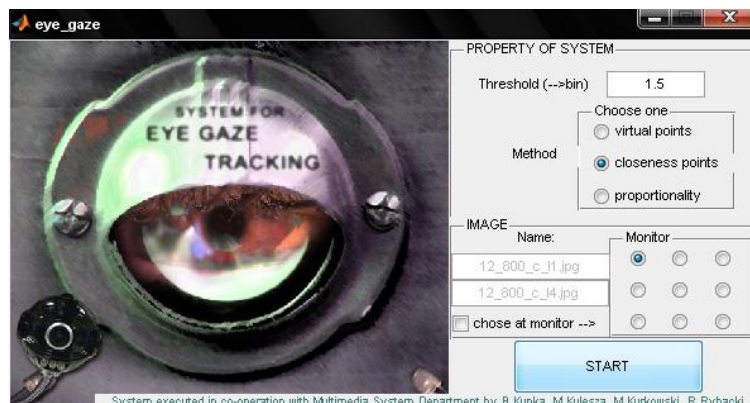


**Rys. 5.7. Numeracja dziewięciu pól przybliżających punkt fiksacji wzroku**

Tak przyjęte oznaczenia pól stosowane są do oznaczania zarówno pól przybliżających punkt fiksacji wzroku jak i punktów charakterystycznych, służących do wyznaczanie opisywanych pól. Podobną numerację przyjęto również w kolejnych metodach.

### 5.2.3. Implementacja algorytmów w środowisku Matlab

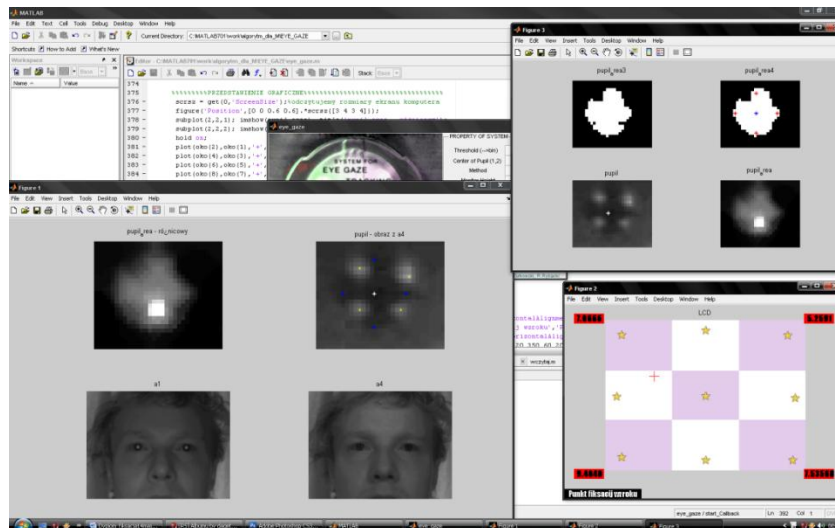
Następnym etapem po rozpisaniu algorytmów potrzebnych do wykrycia poszczególnych zmiennych na drodze poszukiwań punktu fiksacji wzroku, jest etap implementacji algorytmów. W celu dokładnych badań zaimplementowano je w środowisku Matlab, gdzie następnie zostały dokładnie przetestowane. Sprawdzone dokładność wyżej opisanych metod, skuteczność przy różnych warunkach zewnętrznych stanowiska, oraz tolerancję poszczególnych obszarów poszukiwań punktu fiksacji wzorku. Wyniki badań opisano w kolejnym rozdziale. Po implementacji algorytmów w środowisku Matlab, stworzono prosty interfejs użytkownika, widoczny na rys. 5.10.



**Rys. 5.10 GUI Matlab**

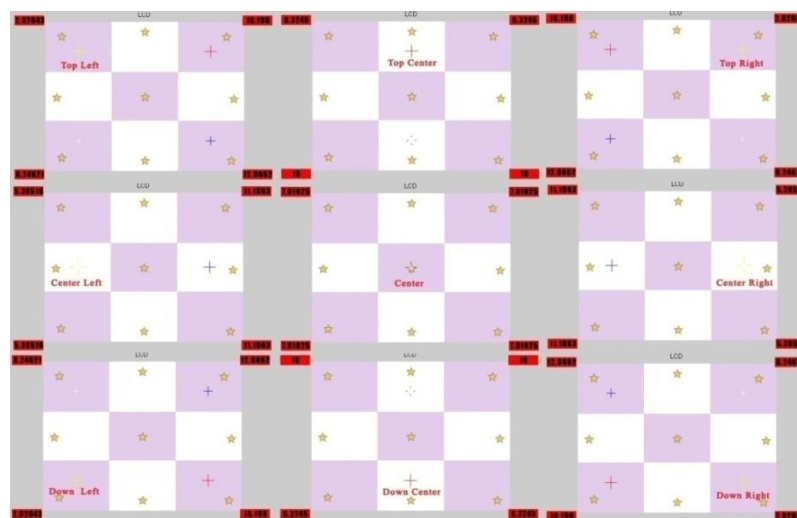


Po wczytaniu odpowiednich danych, ich analizie przez system, dostajemy w odpowiedzi okno programu, na którym widoczne są odpowiednie obszary zainteresowań ROI, etapy wykrywania środka źrenicy oraz interpretacja graficzna przybliżająca poszukiwany punkt fiksacji wzroku na monitorze komputera – rys. 5.11.



Rys. 5.11. Przykład działania systemu w środowisku Matlab

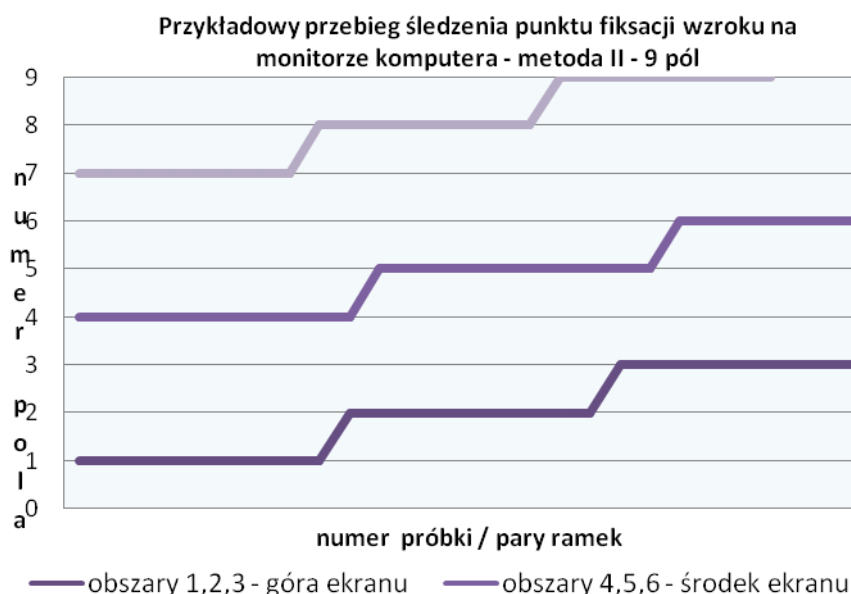
W przypadku opisywania punktu fiksacji wzroku dziewięcioma polami, interpretacja graficzna w środowisku Matlab będzie analogiczna do sytuacji przedstawionej na rys. 5.12.

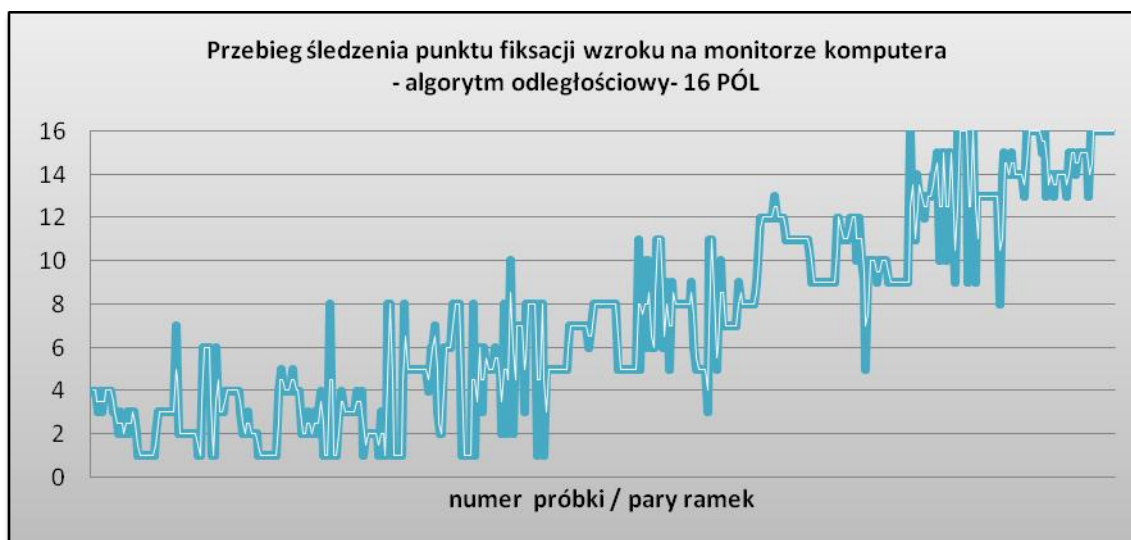


Rys. 5.12. Wynik w postaci interpretacji graficznej

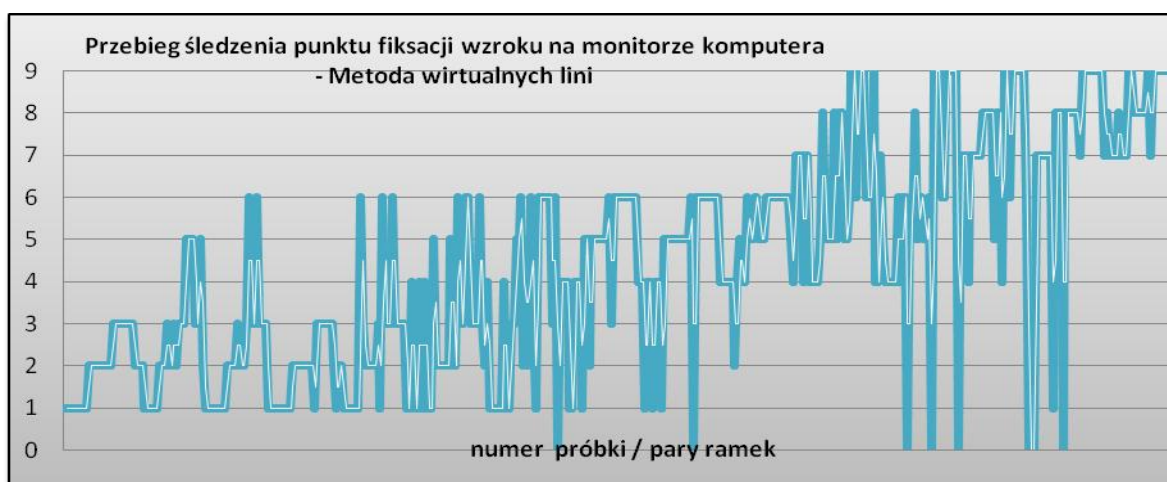
Kolejne punkty fiksacji wzroku na monitorze komputera są rejestrowane, a wynik przedstawiany jest na odpowiednich wykresach przebiegu śledzenia punktu fiksacji wzroku. Na wykresie 5.4, widzimy trzy przykładowe serie śledzenia obszaru zainteresowania. Na ich podstawie jesteśmy w stanie odpowiedzieć na pytania, w jakim

kierunku oraz (w przybliżeniu) gdzie patrzył badany osobnik. W opisywanym przypadku użytkownik podążał wzrokiem z lewej części monitora do prawej przez jego środek na trzech różnych poziomach wysokości monitora.

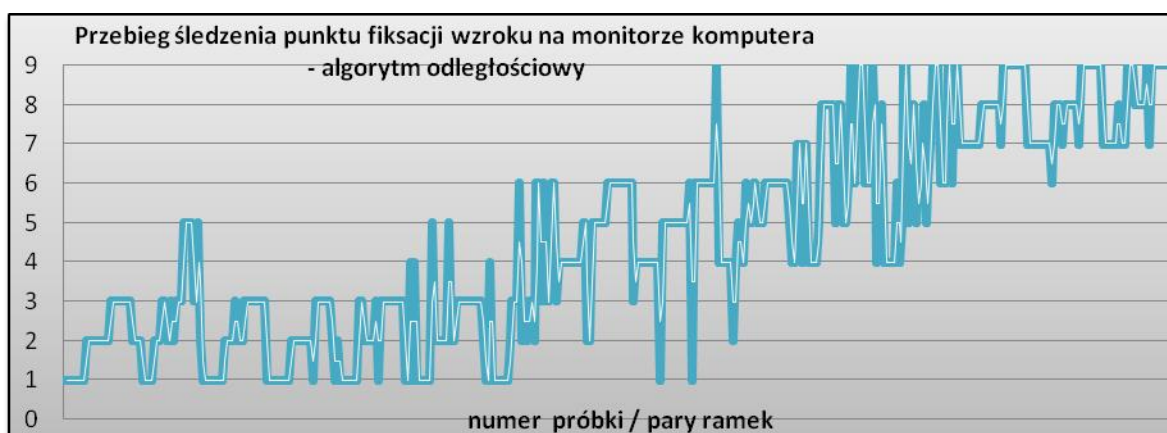




**Wykres 5.5. Przebieg punktu fiksacji wzroku na monitorze komputera – metoda odległościowa 16pól, bez korekcji uzyskanych pomiarów**

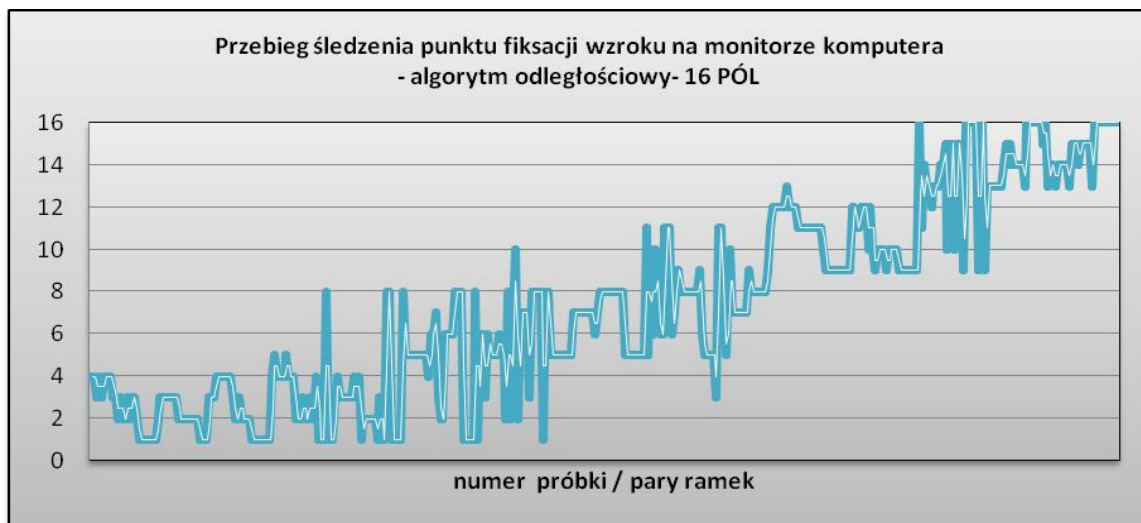


**Wykres 5.6. Przebieg punktu fiksacji wzroku na monitorze komputera – metoda wirtualnych linii, 9pól bez korekcji uzyskanych pomiarów.**

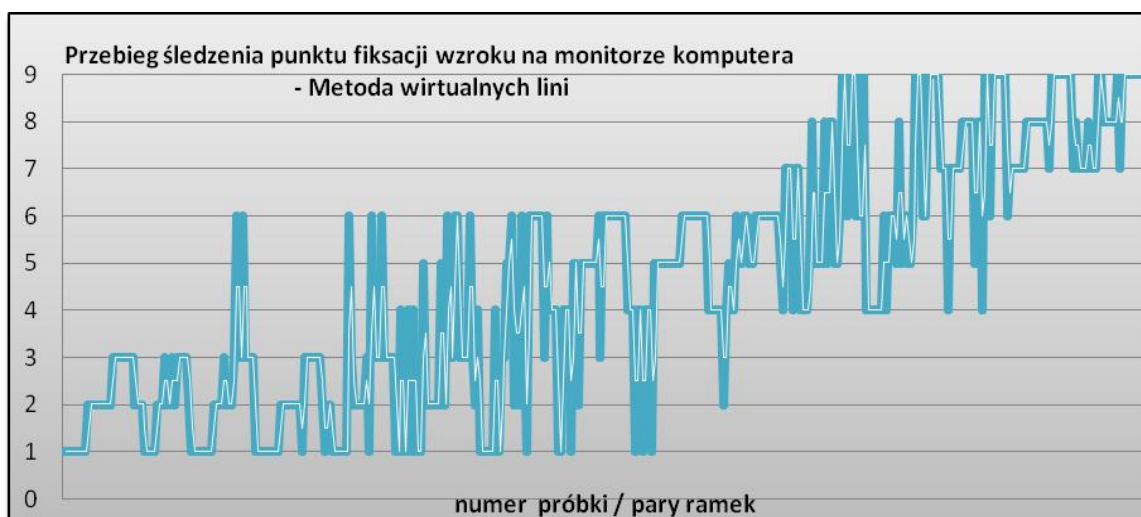


**Wykres 5.7. Przebieg punktu fiksacji wzroku na monitorze komputera – metoda odległościowa 9pól, bez korekcji uzyskanych pomiarów**

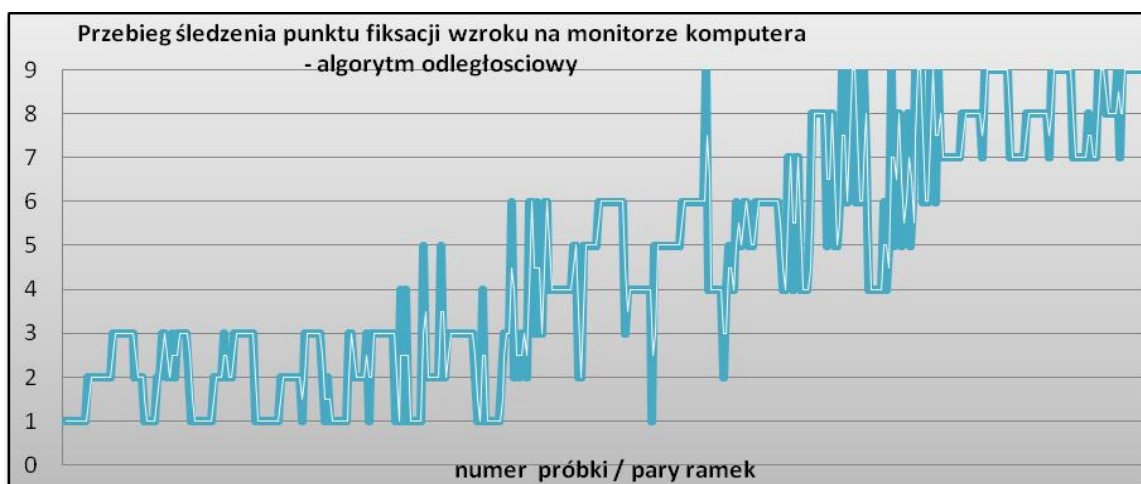
Po odpowiedniej korekcji uzyskanych pomiarów, mającej na celu wyeliminować błędy związane z pomiarami, uzyskano niżej przedstawione charakterystyki.



**Wykres 5.8. Przebieg punktu fiksacji wzroku na monitorze komputera – metoda wirtualnych lini, 16 pól z korekcją uzyskanych pomiarów**



**Wykres 5.9. Przebieg punktu fiksacji wzroku na monitorze komputera – metoda wirtualnych lini, 9pól z korekcją uzyskanych pomiarów**



**Wykres 5.10. Przebieg punktu fiksacji wzroku na monitorze komputera – metoda odległościowa 9pól, z korekcją uzyskanych pomiarów**

Na podstawie wykreślonych danych i linii trendu poszczególnych wykresów widzimy, że użytkownik prowadził swój wzrok od lewej górnej części ekranu do prawej, schodząc coraz niżej. Z dużym prawdopodobieństwem można założyć, że użytkownik czytał tekst na monitorze komputera. Widzimy, że spore wahania przy wyznaczaniu obszaru fiksacji wzroku następowały w środkowej części monitora. Jest to związane z o wiele mniejszą tolerancją algorytmu w tych obszarach. Obszar środkowy otoczony jest ośmioma innymi, stąd też, gdy użytkownik wodzi wzrokiem po obrzeżach środkowego obszaru, jest bardzo prawdopodobne, że algorytm zaklasyfikuje obszar obok jako obszar obserwowany.

Badania przeprowadzone zostały na próbkach obejmujących 459 par poszczególnych klatek, w sztucznie stworzonych warunkach laboratoryjnych, zgodnie z opisywanymi wcześniej założeniami i wymaganiami. Stwierdzono, iż 3 % pomiarów obarczonych jest błędami pomiarowymi. Znaczna większość tych błędów spowodowana była całkowitym bądź częściowym przysłonięciem oka przez powiekę.

Przy porównywaniu obu metod, przy założonej dokładności przybliżenia do dziewięciu pól, wyliczono zbieżność obu metod w 88%. Jest to wynik świadczący o bardzo dobrej skuteczności obu metod w rejonie dziewięciu pól. Rozbieżność wynika z tego, że każda z metod bazuje na nieco innych regułach wyznaczania obszaru fiksacji wzroku. Potwierdzają to otrzymane wyniki, na podstawie których stwierdza się, że różnice w większości przypadków występują na granicach przyległych obszarów. Gdy punkt fiksacji wzroku jest na granicach dwóch obszarów, każdy z algorytmów w nieco inny sposób interpretuje położenie wzroku – a co za tym idzie, w nieco inny sposób wskazuje obszar zainteresowania. Przykładem jest tu pole 6 i 9, gdy badana osoba wodzi wzrokiem na granicach tych obszarów, jeden z algorytmów wskazuje pole 6, drugi natomiast 9.

## 6. System detekcji punktu fiksacji wzroku

### 6.1 Warstwa sprzętowa

Zadaniem warstwy sprzętowej jest dostarczenie do aplikacji ramek obrazu z kamery, które następnie będą poddane analizie. Praca zestawu musi przebiegać tak, aby z akceptowalnym opóźnieniem dokonywać akwizycji i przesyłania ramek obrazu, na przemian ramki z efektem *bright-eye* oraz *glints*.

Na moduł warstwy sprzętowej składają się takie elementy jak:

- kamera internetowa komunikująca się komputerem poprzez złącze USB (Universal Serial Bus)[22]
- układ przełączania sekcji diod podczerwonych (synchronizowany sprzętowo lub programowo)[36]
- dwie sekcje diod (jedną stanowią diody na osi kamery, drugą natomiast zestawy diod na czterech rogach ekranu)

Moduł sprzętowy ma za zadanie współdziałać z analizowanym obiektem, czyli okiem użytkownika. W związku z tym należy tak dobrać parametry pracy układu, aby z jednej strony umożliwić wykonanie algorytmu detekcji punktu fiksacji z jak największą dokładnością, a z drugiej strony zapewnić komfort użytkowania zestawu.

Aby zwiększyć komfort użytkowania systemu oraz uzyskać jak największą dokładność, zestaw pracuje w paśmie światła podczerwonego (IR – infrared). Dzięki temu system może być określany jako nieinwazyjny, a jego praca pozostaje niewidoczna dla użytkownika. Aby umożliwić pracę w takim paśmie niezbędne było dostosowanie kamery internetowej tak, aby była czuła na długość fali emitowanej przez diody podczerwone.

Podstawowym zadaniem układu jest akwizycja ramek zsynchronizowanych z przełączaniem sekcji diod.. Kluczowym zagadnieniem jest zapewnienie pewnej i ciągłej synchronizacji, gdyż wszelkie błędy będą skutkowały uniemożliwieniem detekcji punktu fiksacji przez aplikację. Można to zrealizować za pomocą dwóch sposobów: układ przełączania diod można synchronizować programowo, poprzez impuls synchronizacji pionowej wyodrębniony z układu elektronicznego kamery internetowej. Drugą metodą synchronizacji jest synchronizacja programowa - w tym przypadku decyzja o tym, która sekcja diod powinna być włączona podejmowana jest przez algorytm aplikacji.

Odpowiedni sygnał wysyłany jest przy pomocy portu LPT (IEEE 1284 - Line Print Terminal) lub USB.

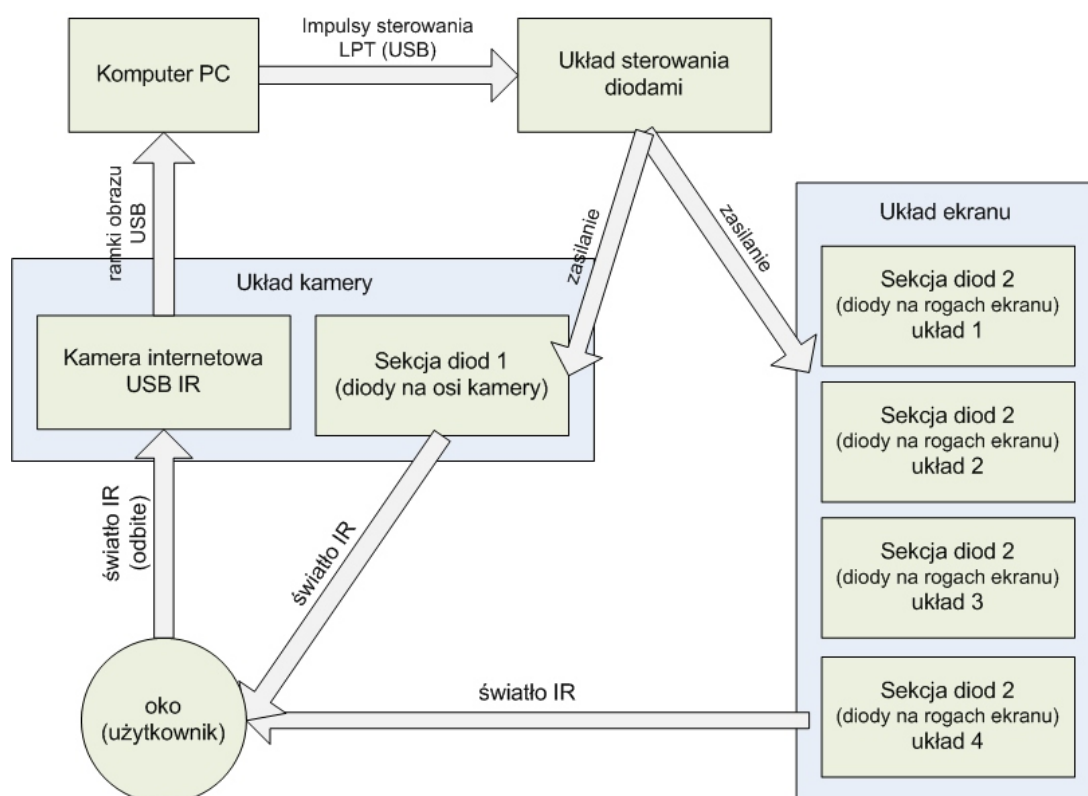
Poniżej przedstawiono szczegółowo realizację obydwu koncepcji modułu sprzętowego.

### 6.1.1 System z przełączaniem programowym

Elementami składowymi systemu z przełączaniem (synchronizacją) programowym są:

- kamera internetowa czuła na światło podczerwone
- układ do sterowania diodami (*LED driver*)
- zestaw dwóch sekcji diod
- elementy montażowe, umożliwiające instalację systemu na monitorze komputerowym
- zaimplementowany algorytm ustalania sygnałów synchronizacji

Ogólny schemat działania systemu został zaprezentowany na rysunku 6.1 .



Rys. 6.1 Schemat działania systemu z synchronizacją programową



Poniżej zostały szczegółowo opisane wszystkie moduły stanowiące omawiany system.

## **Kamera**

Kamera internetowa jak już wcześniej stwierdzono, stanowi kluczowy element systemu detekcji punktu fiksacji. Wybór zastosowanego modelu stanowi kompromis pomiędzy różnymi parametrami kamery.

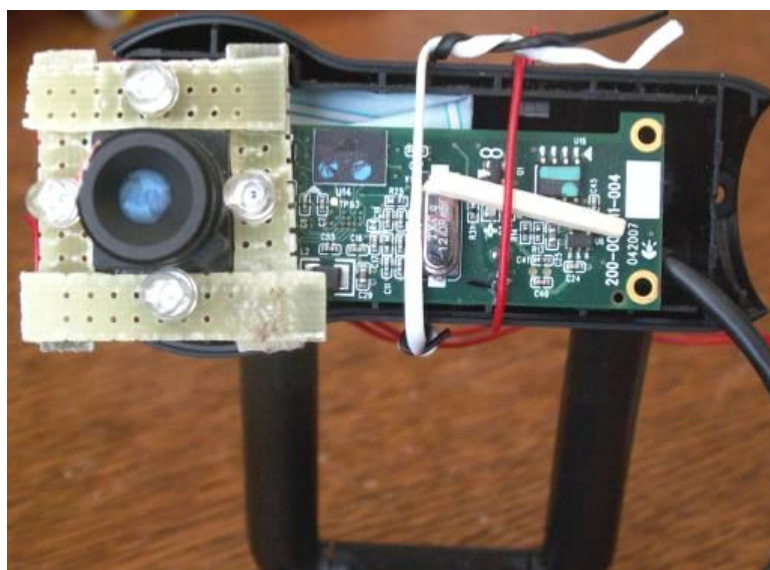
Realizacja opisywanego rozwiązania została oparta o kamerę Logitech 9000 PRO [29]. Możliwości tej kamery pozwalają na pracę w rozdzielczości do 1600x1200 pikseli przy 5 klatkach na sekundę. Do kamery dołączany jest bogaty zestaw sterowników i oprogramowania wspomagającego.



**Rys. 6.2 Zastosowana kamera Logitech 9000 Pro**

Aby dostosować urządzenie do potrzeb systemu, należało dokonać pewnych modyfikacji. Niezbędna była wymiana obiektywu oraz zastosowanie filtra optycznego wycinającego pasmo widzialne, a przepuszczającego światło podczerwone. Zastosowano obiektyw o długości ogniskowej 25mm. Szkła tego obiektywu są specjalnie zaprojektowane do pracy w paśmie podczerwonym, co znacznie poprawia jakość otrzymywanego obrazu. Kamera została ponadto zmodyfikowana również konstrukcyjnie, wyeliminowano oryginalną obudowę i zastosowano statyw umożliwiający dokładne ustalenie położenia kamery. Zmodyfikowana kamera została przedstawiona na rysunku 5.3. Tryb pracy kamery został ustalony na rozdzielczość 800x600 pikseli przy 20 klatkach na sekundę. Zapewnia to kompromis pomiędzy rozdzielczością czasową a przestrzenną systemu.





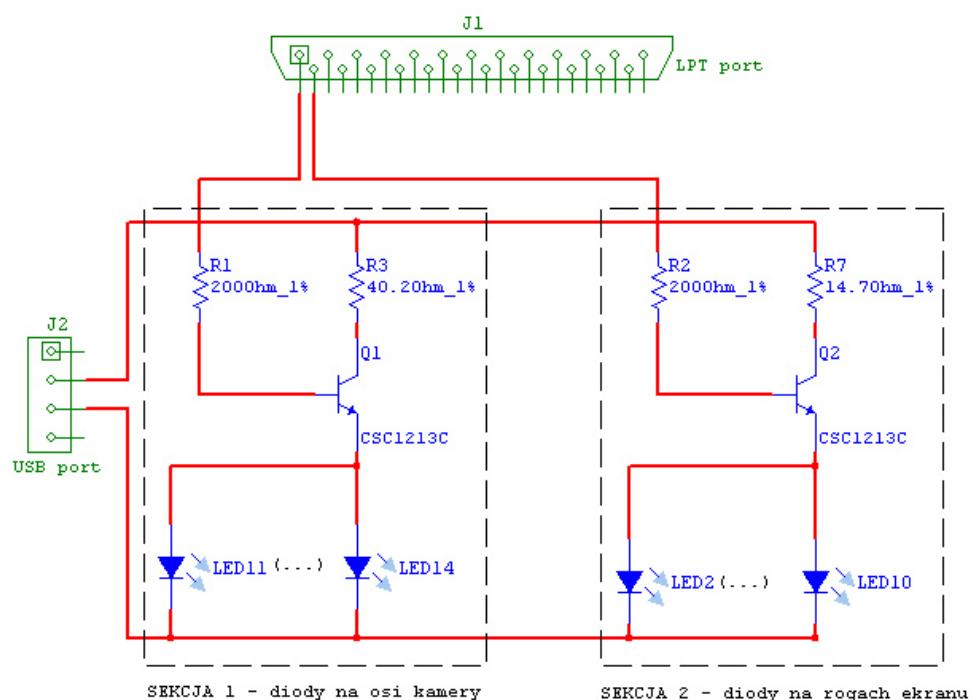
**Rys. 6.3 Zmodyfikowana kamera wraz z sekcją diod**

### **Układ sterowania diodami (*LED driver*)**

Na potrzeby systemu zaprojektowany i skonstruowany został układ elektroniczny, którego celem jest odbieranie sygnałów sterujących z komputera i odpowiednio włączanie lub wyłączanie sekcji diod podczerwonych. Układ może być sterowany przez port LPT lub USB, w zależności od zaimplementowanego rozwiązania.

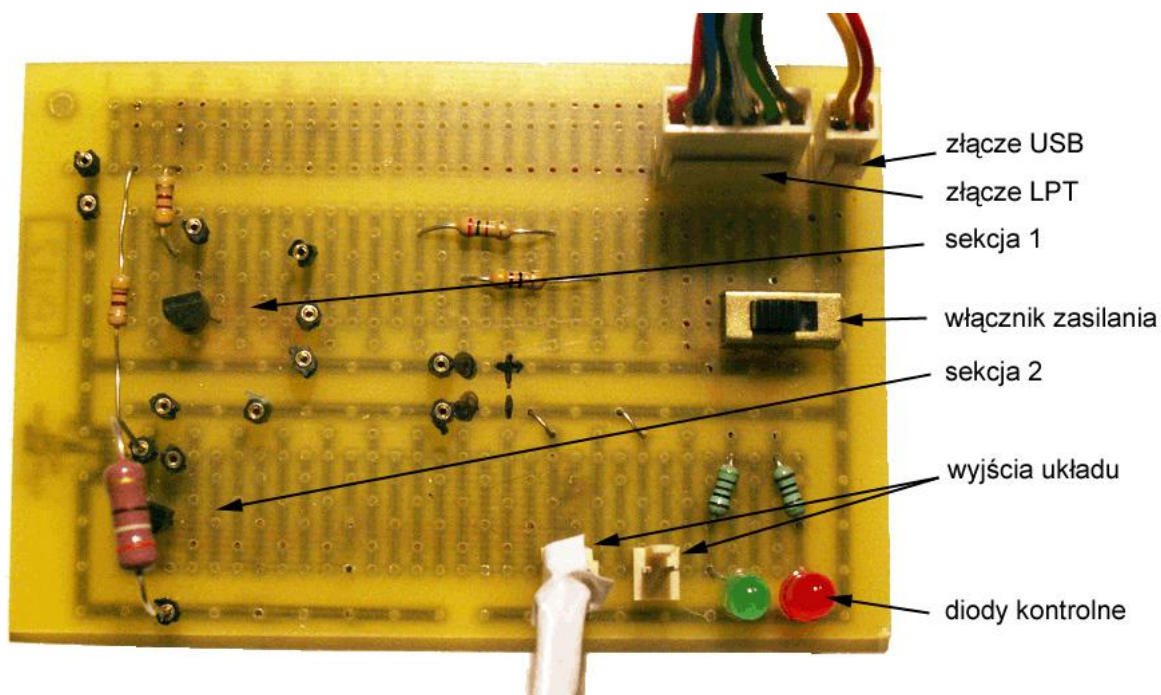
Zaprojektowany układ elektroniczny opiera się na przełączaniu sygnałów zasilania kolejnych sekcji diod sygnałem sterowania, za pomocą dwóch tranzystorów typu NPN. Oprócz tego w projekcie układu, dla każdego tranzystora, znalazł się rezystor w bazie ograniczający sygnał sterowania oraz rezystor w kolektorze. Rezystor kolektora jest kluczowym elementem, którego wartość decyduje o prądzie przepływającym przez diody LED, a zatem o jasności świecenia tych diod.

Układ jest zasilany poprzez złącze USB prądem o napięciu właściwym dla tego portu, czyli 5V. Poziom sygnałów sterujących wynoszą również około 5V i są właściwe dla odpowiednich sygnałów złącz komputerowych. Układ posiada dwa złącza – wyjścia, na których pojawia się sygnał uruchamiający diody LED. Maksymalna wydolność prądowa układu równa jest ograniczeniu prądowemu złącza USB i wynosi 0,5mA. Na rysunku 6.4 został przedstawiony schemat konstrukcyjny omawianego układu.



**Rys. 6.4 Schemat układu do sterowania diodami**

W czasie prac konstrukcyjnych, zestaw został wzbogacony o kilka elementów ułatwiających badania: dodano włącznik zasilania, istotnym elementem są również kontrolne diody LED (zielona i czerwona), umożliwiające obserwację pracy układu. Rysunek 6.5 prezentuje realizację konstrukcji sterownika.



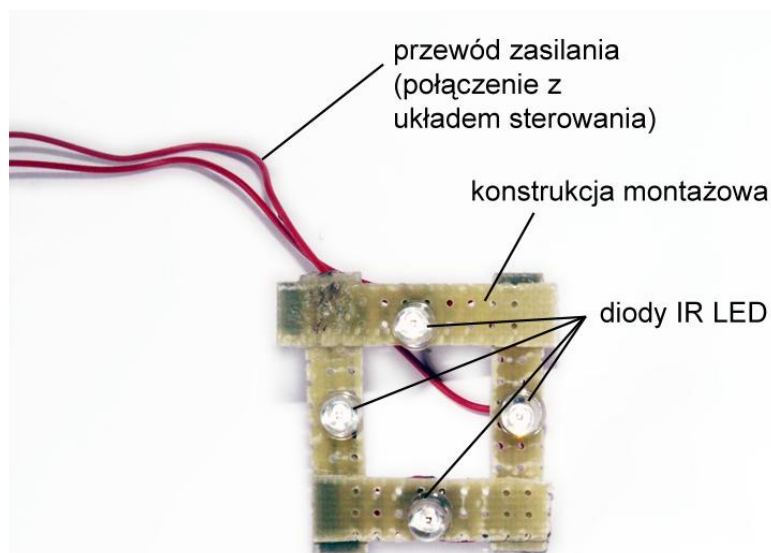
**Rys. 6.5 Realizacja układu do sterowania diodami**

## Sekcje diod podczerwonych

Zadaniem diod podczerwonych zastosowanych w systemie jest emitowanie światła podczerwonego, które po odbiciu od powierzchni oka użytkownika trafia do kamery. Zestaw diod został podzielony na dwie, niezależnie przełączane sekcje.

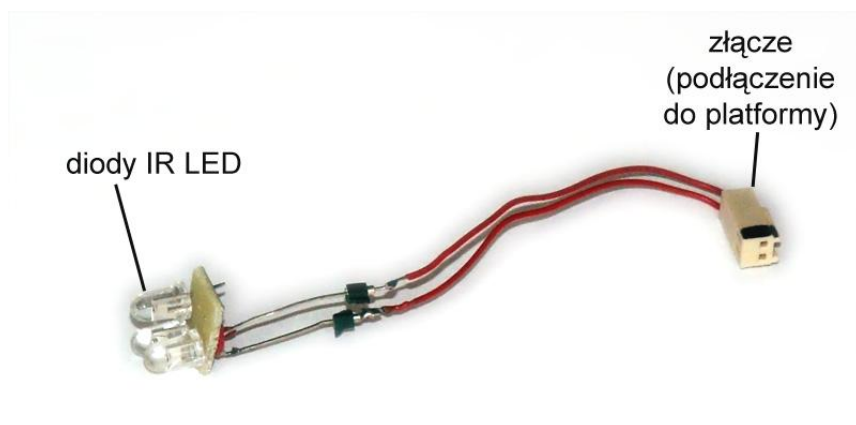
Przy ciągłej pracy systemu detekcji punktu fiksacji wzroku, obie sekcje są włączane naprzemiennie.

Sekcję pierwszą stanowią diody umieszczone tuż przy obiektywie (rysunek 6.3), świecące równoległe do osi obiektywu kamery. Diody te zostały umieszczone na specjalnie skonstruowanym mocowaniu, które zostało dostosowane do kształtu obiektywu. Dzięki temu konstrukcję zawierającą diody można stabilnie umieścić przy obiektywie tak, że diody znajdują się wokół obiektywu.

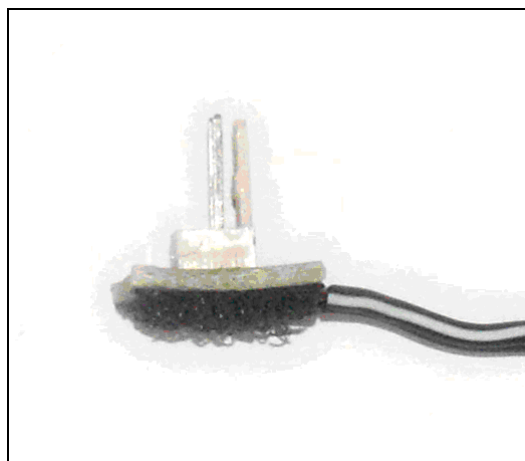


Rys. 6.6 Sekcja diod "na osi"

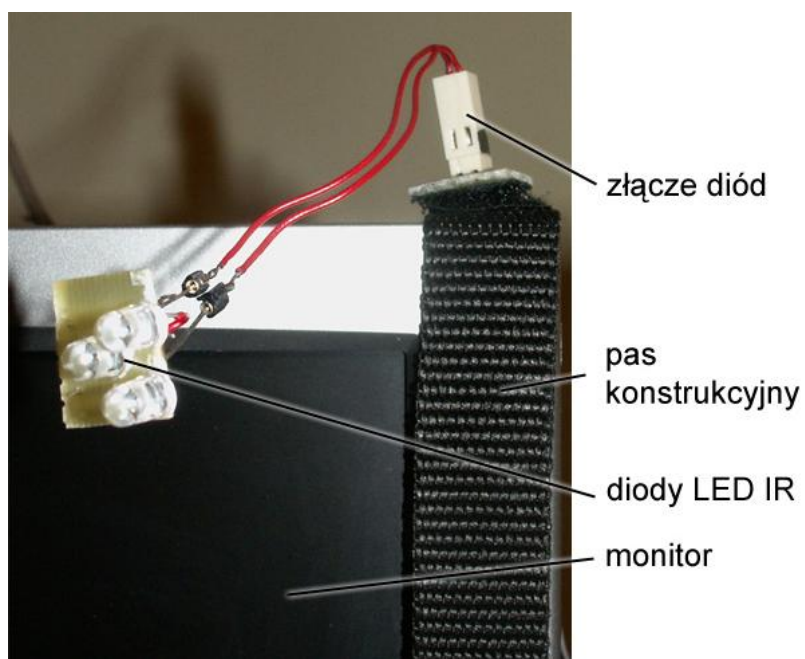
Sekcję drugą stanowią natomiast diody, instalowane na czterech narożnikach ekranu. Każda z czterech grup diod jest umieszczona na płycie montażowej, która znów jest przymocowana do wtyczki za pomocą elastycznego drutu. Dzięki takiej konstrukcji można dowolnie i w stabilny sposób ustalić kierunek świecenia zestawu diod tak, aby odbicie światła od oka trafiające do kamery było jak najsilniejsze.



**Rys. 6.7 Grupa diod**



**Rys. 6.8 Platforma montażowa dla grupy diod**



**Rys. 6.9 Przykładowa grupa diod wraz z mocowaniem**

Na całą sekcję diod składają się cztery grupy – dwie dolne i dwie górne. Górne zestawy zostały zaopatrzone w trzy diody, a dolne w dwie. Spowodowane jest to tym, że odbicie dolnych diod skuteczniej trafia do obiektywu kamery, który jest umieszczony na tej samej wysokości do dolne grupy (czyli na wysokości dolnej krawędzi monitora).

### Elementy montażowe

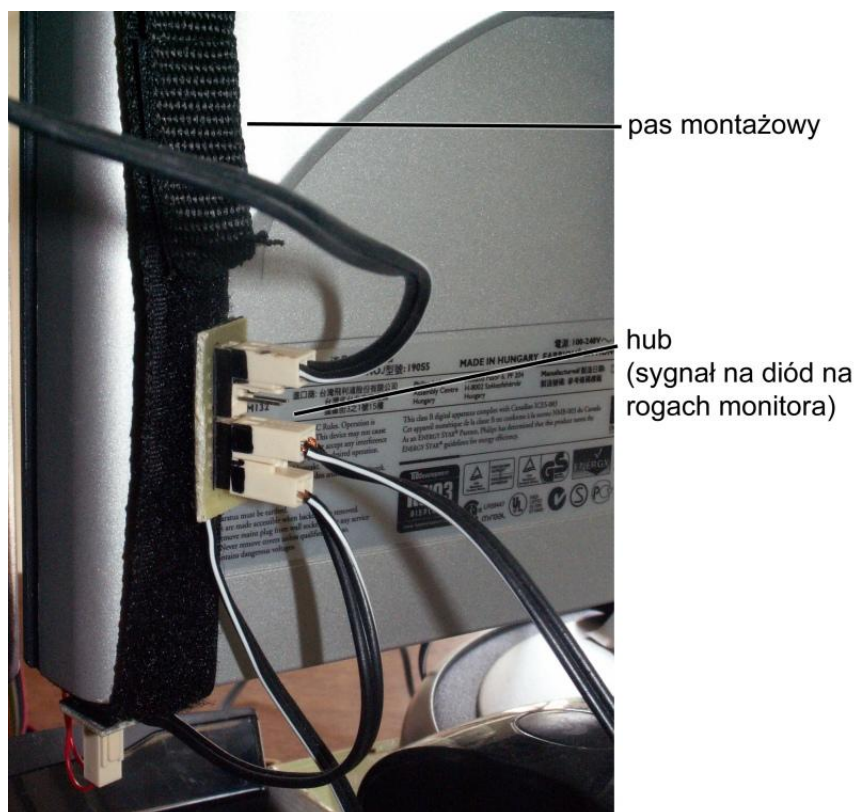
Niezbędną część systemu stanowią elementy montażowe, umożliwiające montaż diod na rogach ekranu. Podstawowym elementem jest pas konstrukcyjny, który stanowi pas materiału o szerokości 16mm, który można stabilnie zamocować na krawędzi ekranu. Długość pasa konstrukcyjnego pozwala na zastosowanie w monitorach o przekątnych od 15” do 24”. Do pasa przyszyte zostały rzepy, które umożliwiają opięcie go wokół krawędzi monitora oraz zamontowanie platform, do których przyłączane są grupy diod.



**Rys. 6.10 Pas montażowy**

Grupy te są przyłączane za pomocą gniazda 2-pinowego. Każda z czterech platform jest połączona kablem z płytką (hub), na której znajduje się rozdział sygnału pochodzącego od układu do sterowania diod. W ten sposób realizowane jest zasilanie diod.

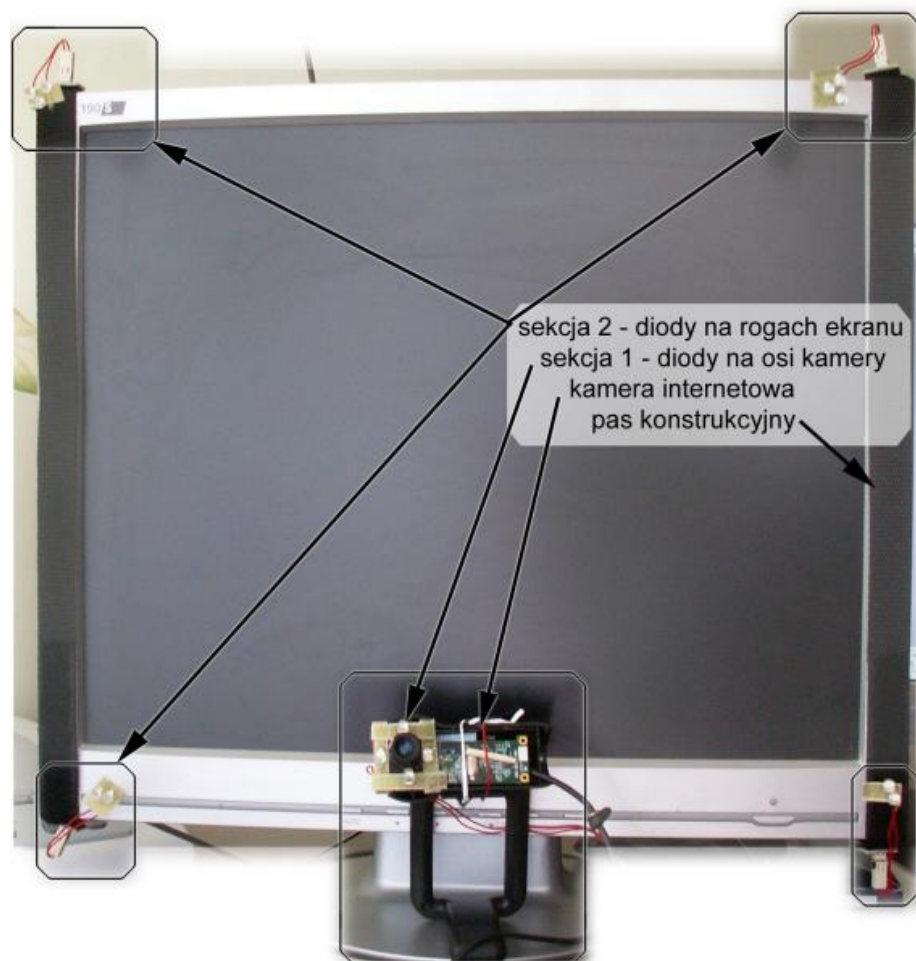




Rys. 6.11 Tył monitora wraz z okablowaniem

### Stanowisko robocze

Wszystkie opisane powyżej elementy, wraz z monitorem komputerowym, składają się na stanowisko robocze opisywanego systemu. Prototypowe stanowisko zostało zaprezentowane na rysunku 5.7. Na każdym z rogów ekranu widzimy grupę diod. W środkowej części, przy dolnej krawędzi ekranu znajduje się kamera wraz sekcją diod „na osi”.



Rys. 6.12 Prototypowe stanowisko robocze

### Implementacja algorytmu ustalania sygnałów synchronizacji

Warstwa programowa, której zadaniem jest ustalenie sygnałów synchronizacji, zajmuje się bezpośrednio sterowaniem wartością sygnałów wyjściowych w odpowiednim porcie komputera. W opisywanej realizacji systemu jako sterujący został wybrany port LPT, ze względu na łatwość implementacji sterowania. Sterowanie portem odbywa się za pomocą sterownika *giveio*, który musi być zainstalowany w systemie przed uruchomieniem całej aplikacji. W gotowym rozwiązaniu w początkowej fazie działania aplikacji dokonywana jest inicjalizacja sterownika, a następnie sygnały są ustalane za pomocą funkcji zaimplementowanej w języku *Assembler*.

## **Podsumowanie**

Powyżej przedstawiono szczegółowy opis warstwy sprzętowej systemu detekcji punktu fiksacji wzroku realizującej zadanie synchronizacji sekcji diod na podstawie sygnałów sterujących generowanych przez aplikację systemu. Rozwiązanie to znalazło zastosowanie w finalnej wersji systemu. Zostało również wykorzystane do przeprowadzenia badań i testów opisanych w rozdziale 6.3.

### **6.1.2 System z przełączaniem sprzętowym**

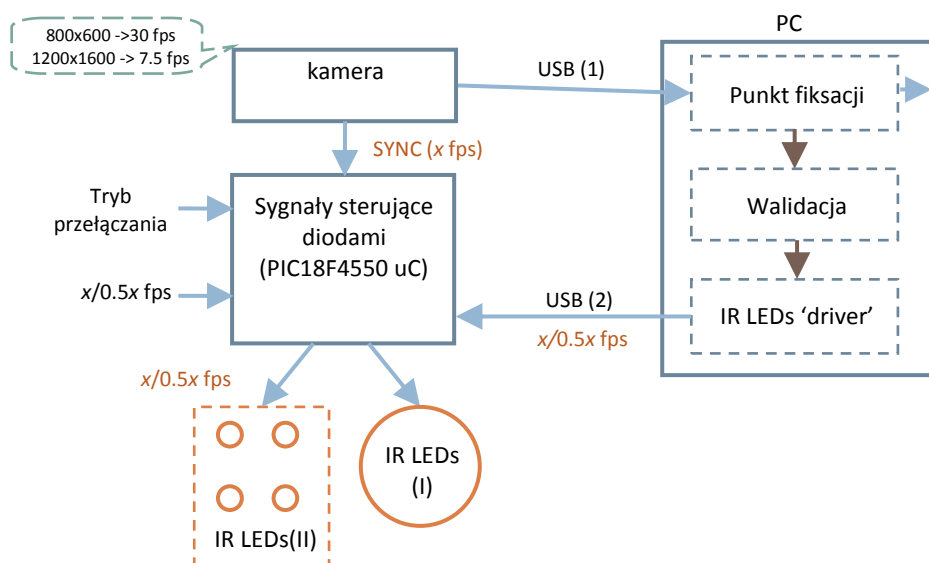
W ramach prac projektowych nad systemem detekcji punktu fiksacji wzroku prowadzonych w Katedrze Systemów Multimedialnych Politechniki Gdańskiej został zaprojektowany układ, którego zadaniem jest sprzętowa synchronizacja i przełączanie sekcji diod podczerwonych. Synchronizacja odbywa się na podstawie wyodrębnionego z układu kamery impulsu synchronizacji pionowej.

Układ pozwala na synchronizację sekcji diod w trybach 1:1 lub 2:1, czyli przełączając diody odpowiednio co jedną lub co dwie ramki. Właściwość ta pozwala na uniwersalne dostosowanie funkcjonalności urządzenia do potrzeb określonych przez przedmiot badań lub warunki zewnętrzne.

Urządzenie pozwala również na wybór źródła sterowania diodami. Układ może być sterowany, tak jak wcześniej wspomniano, impulsami synchronizacji pionowej obrazu kamery lub impulsami generowanymi przez aplikację komputerową przez interfejs USB.

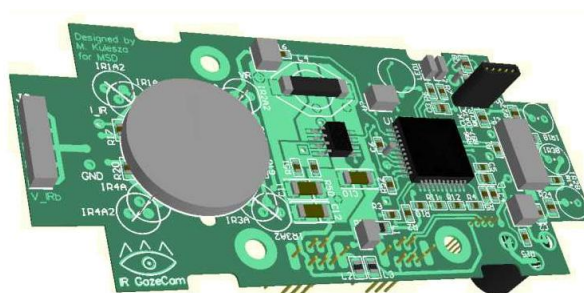
Ogólny schemat działania układu przedstawia rysunek 6.13.





**Rys. 6.13** Schemat układu do synchronizacji sprzętowej

Na rysunku 6.14 przedstawiono realizację omawianego układu.



**Rys. 6.14** Realizacja układu do synchronizacji sprzętowej

## Podsumowanie

Powyżej opisano uniwersalny układ synchronizacji diod, zaprojektowany w ramach prac w Katedrze Systemów Multimedialnych Politechniki Gdańskiej. Układ ten posiada szeroką funkcjonalność i może być istotnym narzędziem zwiększającym użyteczność opisywanego systemu detekcji punktu fiksacji wzroku.

### 6.1.3 Wyniki badań

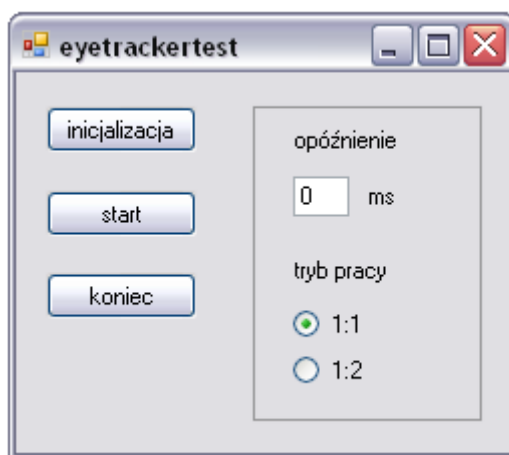
Opisany w rozdziale 6.1.1 układ został poddany wielu wnikliwym testom i badaniom, których celem była optymalna konstrukcja urządzenia oraz weryfikacja skuteczności działania rozwiązania. Poniżej znajdują się opis i wyniki poszczególnych badań.

#### Aplikacja zastosowana do badań

W celu przeprowadzenia badań dotyczących opisywanego sprzętu została stworzona aplikacja komputerowa umożliwiająca wykonanie zaplanowanych badań. Aplikacja napisana została w języku C++ za pomocą środowiska programistycznego *Microsoft Visual Studio C++* [30]. Utworzona aplikacja oferuje następujące możliwości:

- synchronizacja i przełączanie sekcji diod
- pobieranie obrazu z obsługiwanej kamery
- zapisywanie kolejnych ramek jako obrazki *JPEG*
- praca w trybie 1:1 lub 1:2 (z przetwarzaniem co drugiej ramki)
- manualne wprowadzanie opóźnienia synchronizacji diod
- praca z wybraną rozdzielczością obrazu

Za pomocą opisywanej aplikacji testowej zostały wykonane opisywane w bieżącym rozdziale badania. Na rysunku 6.15 przedstawiono interfejs omawianej aplikacji.



Rys. 6.15 Interfejs aplikacji zastosowanej do wykonania badań

## **Rozmiar źrenicy w kadrze a parametry pracy systemu**

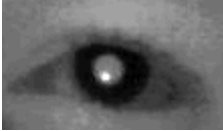
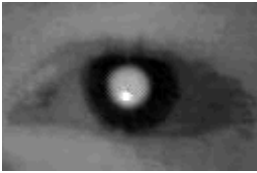
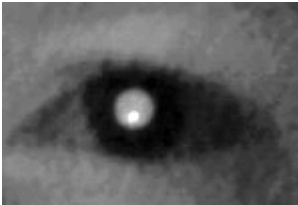
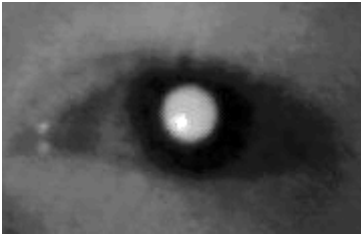
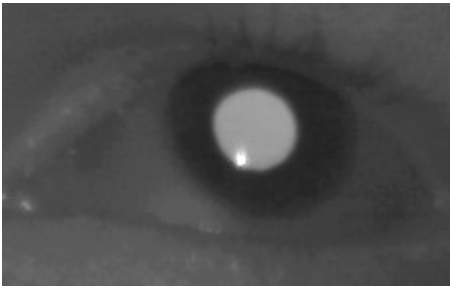
Kluczową kwestią dla dokładności wyznaczania punktu fiksacji wzroku jest rozmiar źrenicy oka w kadrze kamery. Źrenica stanowi obszar zainteresowania, na którym przeprowadzane są operacje decydujące o wyniku. Średnica źrenicy w kadrze stanowi zatem istotny parametr decydujący o jakości pracy systemu.

W trakcie prac zostały zbadane średnice źrenicy w kadrze w zależności od parametrów eksploatacyjnych kamery takich jak rozdzielczość obrazu oraz długość ogniskowej obiektywu. Wyniki badań przedstawia tabela 6.1.

W związku z tym, że najkorzystniejszy dla działania systemu jest układ parametrów, dla których źrenica jest jak największa, w realizacji systemu zastosowano obiektyw o długości ogniskowej 25mm i rozdzielczość 800x600 pikseli. Pozwoliło to na uzyskanie obrazu źrenicy o średnicy około 40 pikseli.

Należy wspomnieć, że optymalne ze względu na rozmiar źrenicy parametry pogarszają inne parametry pracy systemu, takie jak rozdzielczość czasowa systemu, wymagania co do mocy obliczeniowej zestawu komputerowego oraz stopień niezależności na położenie głowy użytkownika przed komputerem. Jednak ze względu na właściwości badanego systemu oraz na potrzeby znalezienia kompromisu pomiędzy parametrami opisywany zestaw parametrów eksploatacyjnych i optycznych kamery uznany został za optymalny.

**Tabela 6.1 Rozmiar źrenicy w kadrze w zależności od parametrów kamery**

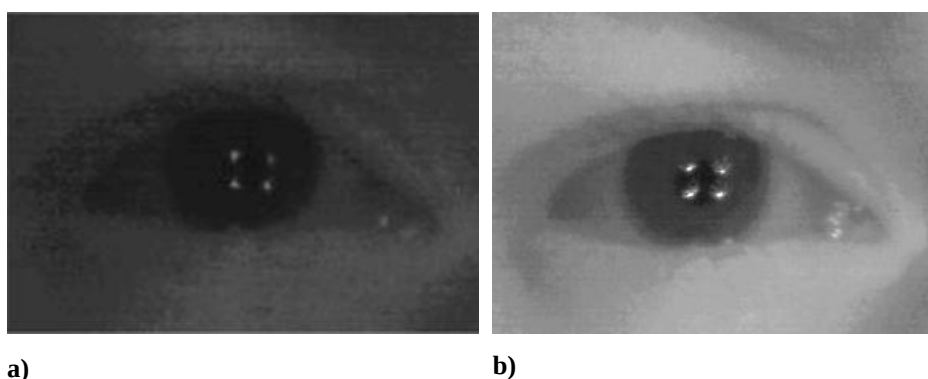
| <b>Długość ogniskowej obiektywu [mm]</b> | <b>Rozdzielczość obrazu [piksel]</b> | <b>Poglądowy rysunek oka</b>                                                         | <b>Średnica źrenicy w kadrze [piksel]</b> |
|------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| 12                                       | 640x480                              |     | 12                                        |
| 12                                       | 800x600                              |     | 16                                        |
| 16                                       | 640x480                              |    | 16                                        |
| 16                                       | 800x600                              |  | 24                                        |
| 25                                       | 800x600                              |  | 40                                        |

### **Zależność obrazu źrenicy od typu użytego obiektywu**

W ramach prac badawczych zostały przetestowane dwa typy obiektywów:

- obiektywy standardowe (8mm, 12mm, 16mm)
- obiektywy dostosowane do pracy w paśmie podczerwonym (16mm, 25mm)

Zaobserwowano istotne różnice w jakości obrazu dla obu typów soczewek, dla obiektywów o danej długości ogniskowej. Wyniki obserwacji wykonane dla obiektywów o długości ogniskowej 16mm zostały zaprezentowane na rysunku 6.16. Zaprezentowane zdjęcia zostały przekształcone cyfrowo za pomocą transformacji histogramu tak, aby różnica jakości była widzialna dla oka.



**Rys. 6.16** Porównanie jakości obraz w zależności od typu obiektywu: a – obiektyw standardowy, b - obiektyw przystosowany do pracy w podczerwieni

W wyniku zastosowania obiektywu dostosowanego do pracy w paśmie podczerwonym znacznie wzrósł stosunek sygnału do szumu. Parametr ten odgrywa decydującą rolę dla wykrywania położenia punktów charakterystycznych przez algorytm przetwarzania obrazu. Wyniki badań przedstawione zostały w tabeli 6.2 .

**Tabela 6.2** Stosunek sygnału do szumu w zależności od typu zastosowanego obiektywu

| Typ obiektywu | Próg szumów | Jasność punktu <i>glint</i> | SNR [dB] |
|---------------|-------------|-----------------------------|----------|
| Standardowy   | 58          | 13                          | 4,90     |
| IR            | 23          | 33                          | 3,15     |

Jak widać z powyższego zestawienia, zmiana obiektywu na dostosowany do pracy w podczerwieni spowodowała wzrost współczynnika SNR o 1,75 [dB].

### **Badania nad kodekiem kompresji wideo H.264**

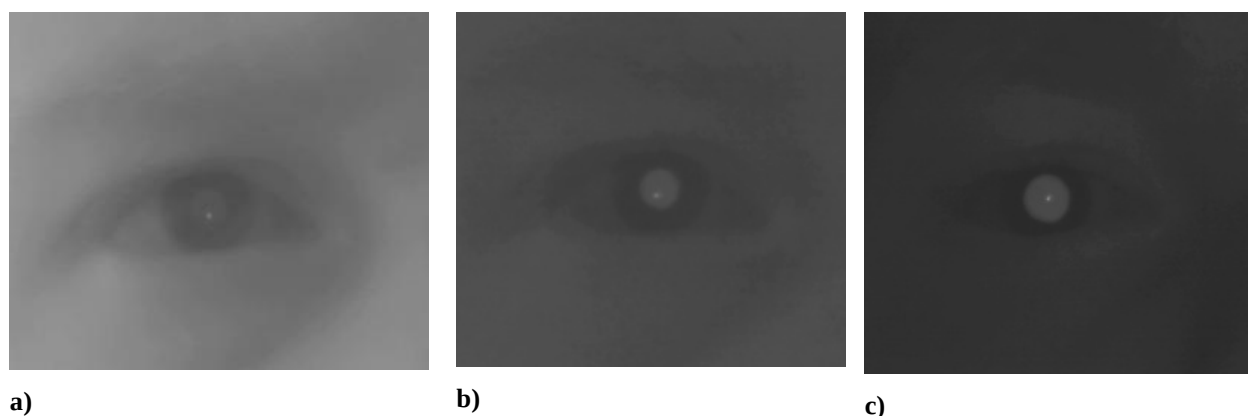
Obraz przesyłany z badanej kamery internetowej do komputera przez złącze USB kompresowany jest za pomocą kodeka H.264 [21][18]. Kompresję tą uzasadnia niewystarczająca, w porównaniu z potrzebami kamery wideo, przepływność oferowana przez złącze USB.

Kodek ten oferuje między innymi kompresję predykcyjną, w której zawartość kolejnej ramki jest zależna od zawartości ramki poprzedniej. Zależność ta jest tym większa im większe są zmiany oświetlenia w kadrze oraz im większa jest częstotliwość pobierania ramek. W takim przypadku wysyłane przez kamerę ramki obrazu składają się po części z obrazu oryginalnego, a po części z obrazu, który został otrzymany z poprzedniej ramki. W związku z tym, niemożliwe okazało się uzyskanie w kolejnych ramkach oryginalnego obrazu, który został utrwalony na matrycy kamery.

Zjawisko to zostało zaobserwowane dla kilku różnych modeli badanych kamer, co sugeruje fakt, że jest to efekt typowy dla tego typu urządzeń. Efekt ten występuje zarówno dla przełączania z synchronizacją programową, jak i sprzętową. Problem ten rozwiązano stosując dwukrotnie mniejszą częstotliwość przełączania diod. W ten sposób wykorzystywana jest tylko co druga ramka wysyłana przez kamerę. Umożliwia to jednak poprawną akwizycję obrazu aktualnie zapisywanego przez matrycę kamery.

### **Zależność obrazu źrenicy od warunków oświetleniowych**

Praca źrenicy oka ściśle zależy od warunków oświetleniowych w pomieszczeniu. Związane jest to z tym, że przy większym natężeniu światła, źrenica oka zawęża się. Również obraz widziany przez kamerę w paśmie podczerwonym ściśle zależy od ilości bezpośredniego światła słonecznego w otoczeniu. Porównanie obrazu oka w różnych warunkach zostało przedstawione na rysunku 6.17.



**Rys. 6. 17 Obraz źrenicy oka w zależności od warunków oświetleniowych: a – słoneczny dzień, b – pochmurny dzień, c – zmierzch.**

Wyniki porównania wskazują, że parametry analizowanego obrazu znacznie różnią się od siebie w zależności od warunków oświetleniowych. W słoneczny dzień otrzymywany obraz porównywalny jest z obrazem w paśmie widzialnym przetransformowanym do skali szarości. Natomiast w przypadku braku bezpośredniego oświetlenia słonecznego analizowany obraz zawiera prawie wyłącznie widoczną źrenicę oka.

Podsumowując, wyniki badań wskazują na potrzebę adaptacyjnego ukształtowania algorytmu przetwarzania obrazu tak, aby zapewnić optymalną elastyczność działania systemu.

## **6.2 Oprogramowanie systemu**

Opisywany system detekcji punktu fiksacji składa się z opisanej powyżej warstwy sprzętowej oraz aplikacji komputerowej. Aplikacja ta jest najbardziej istotną częścią systemu, decydującą o jakości i dokładności całego systemu.

Zadaniem aplikacji jest kolejno:

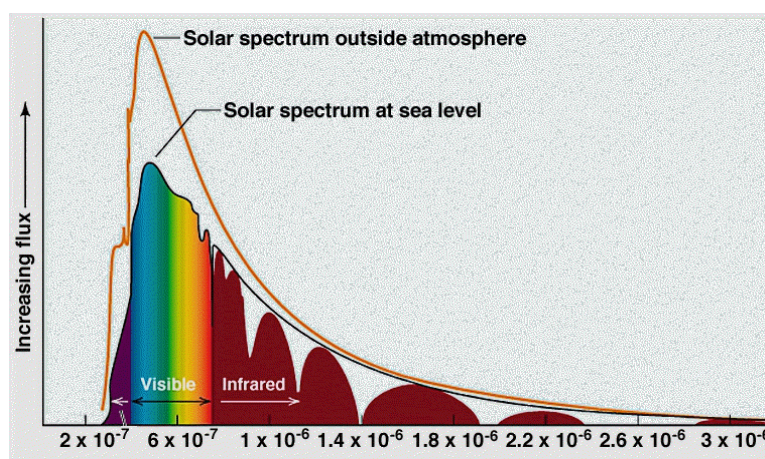
- pobieranie generowanych przez kamerę i przełączające się diody obrazów
- przetwarzanie otrzymywanego obrazu w celu uzyskania adekwatnej formy
- wyznaczenie współrzędnych położenie punktów charakterystycznych
- określenie punktu fiksacji wzroku na ekranie
- wykorzystanie wyniku lub jego transfer do innej aplikacji lub systemu operacyjnego

Poniżej opisano szczegółowo zarówno warunki pracy systemu, samą aplikację oraz algorytmy działania, których celem jest jak najbardziej precyzyjne wyznaczenie punktu fiksacji wzroku.

## 6.2.1 Środowisko pracy i wymagania sprzętowe

### Środowisko pracy

Koncepcja opisywanego systemu oparty jest o pracę z diodami LED jako źródłami podczerwieni. W związku z tym sposób działania systemu silnie związany z natężeniem światła podczerwonego padającego na matrycę kamery. Duży wpływ na ilość tego promieniowania ma ilość światła słonecznego w pomieszczeniu. Podczerwień jest bowiem istotnym składnikiem widma promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni Ziemi [20][19] (wykres 6.1).



Wykres 6. 1 Struktura widmowa promieniowania słonecznego

Stopień wypełnienia przestrzeni pracy systemu promieniowaniem podczerwonym ma znaczny wpływ na precyzję wyników. Badania wpływu ilości promieniowania znajdują się w podrozdziale 6.3 . Poprawna praca systemu wymaga więc spełnienia następujących warunków:

- należy zapewnić jak najmniejszy stopień ilości światła słonecznego w pomieszczeniu
  - ✓ w przypadku pracy w dzień w warunkach dużego nasłonecznienia należy zapobiec przedostawaniu się światła słonecznego do pomieszczenia poprzez zakrycie okien



- ✓ w przypadku pracy w pochmurny dzień należy również ograniczyć ilość światła dziennego w pomieszczeniu, ma to znaczny wpływ na dokładność systemu
- niezależnie od warunków oświetlenia słonecznego należy zapewnić takie miejsce pracy, aby twarz użytkownika była równomiernie oświetlona (należy zapobiec znacznemu oświetleniu bocznemu)

Spełnienie powyższych warunków umożliwi poprawną pracę z aplikacją i uzyskanie maksymalnej wydajności i dokładności.

### **Wymagania sprzętowe**

Aplikacja do poprawnego działania wymaga pewnej ilości zasobów, zarówno obliczeniowych jak i pamięci. Wydajność aplikacji została zoptymalizowana na etapie projektowania i realizacji, jednak ze względu na dużą ilość wykonywanych operacji arytmetycznych niezbędne zasoby zostały jasno sprecyzowane.

Ściśle określony jest też rozmiar monitora, z którym aplikacja będzie poprawnie współpracowała. Monitor komputerowy powinien mieć stosunek boków 4:3, a długość jego przekątnej powinna wynosić 17 lub 19 cali.

Monitor o mniejszych wymiarach może spowodować znaczny spadek dokładności systemu, natomiast monitor o większych rozmiarach może spowodować niewłaściwe działanie aplikacji.

Wymagania sprzętowe dotyczące zestawu komputerowego są następujące:

- komputer klasy PC
- procesor dwurdzeniowy (lub mocniejszy)
- 512 MB pamięci RAM
- monitor o przekątnej 17 lub 19 cali
- system operacyjny Windows XP

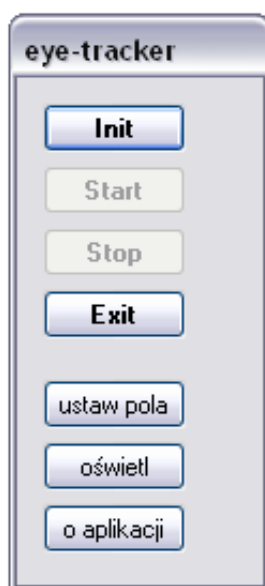
Opisana aplikacja jest kompletnym systemem, przy zachowaniu opisanych wymagań, działającym niezależnie od platformy komputerowej. System został skonstruowany w taki sposób, żeby zapewnić jak największą skalowalność, uniwersalność i przenośność rozwiązania.

## 6.2.2 Opis aplikacji

### Opis interfejsu aplikacji

Opisywaną aplikację stanowi samodzielny program, który wykonuje wszystkie przedstawione we wstępie zadania i wyświetla wynik na ekranie. Program stanowi zbiór w postaci pliku wykonywalnego typu *exe*, który jest uruchamiany w celu rozpoczęcia pracy z aplikacją.

Po uruchomieniu aplikacji, interfejs użytkownika umożliwia wykonanie czynności niezbędnych do rozpoczęcia pracy. Wygląd okienka programu został zaprezentowany na rysunku 6.18.



Rys. 6. 18 Interfejs aplikacji

Pierwszą grupę stanowią cztery przyciski, którymi można sterować działaniem aplikacji. Przycisk *Init* powoduje rozpoczęcie procedury konfiguracji i inicjalizacji kamery. Przyciskami *Start* i *Stop* można włączać lub wyłączać działanie oprogramowania. Przycisk *Exit* służy natomiast do zamykania aplikacji.

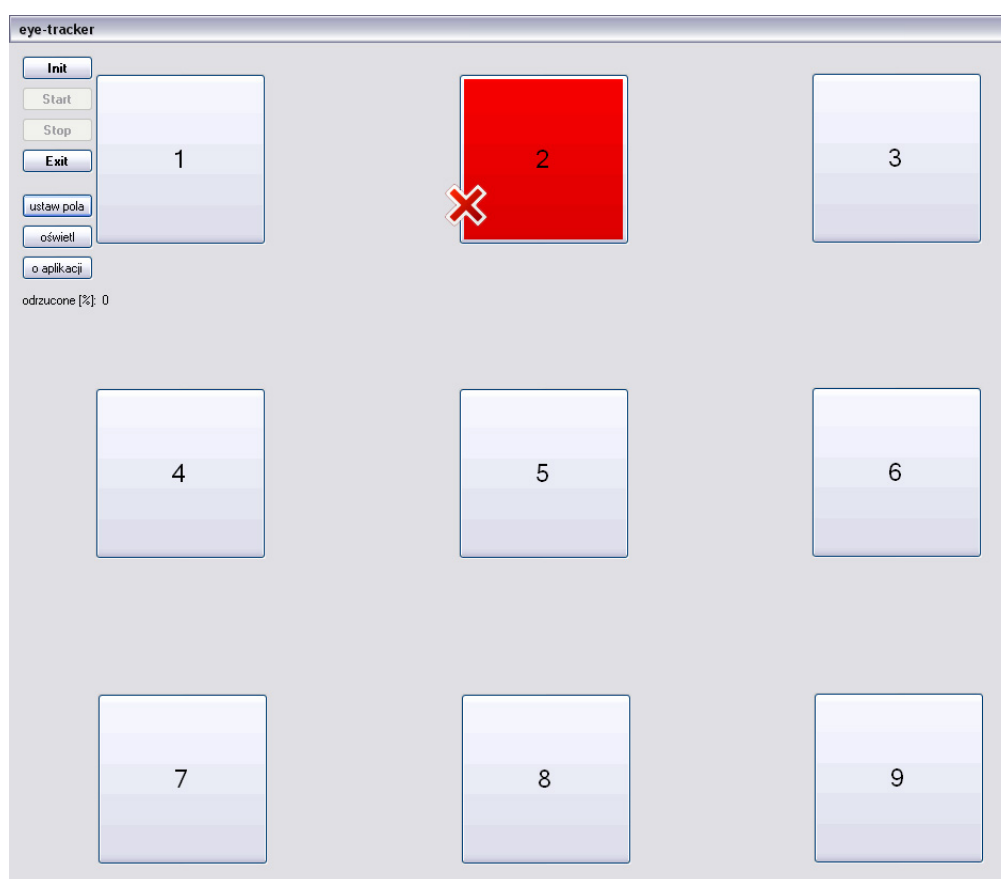
Nieco niżej w okienku programu znajdują się trzy przyciski narzędziowe. Przycisk *oświetl* powoduje włączenie obu sekcji diod podczerwonych, w celu jak najbardziej intensywnego oświetlenia kadru kamery. Jest to funkcja przydatna przy ustawianiu

pozycji kamery, pozycji użytkownika oraz przy ewentualnej korekcie ostrości obiektywu. Po rozpoczęciu pracy funkcja przełączania sekcji diod zostaje przywrócona.

Przycisk *o aplikacji* powoduje wyświetlenie informacji o aplikacji i autorze. Dzięki tej funkcji użytkownik może się zapoznać z ww. informacjami.

Przycisk *ustaw pola* przygotowuje oprogramowanie do pracy pod kątem wyświetlania wyniku obliczeń. Po kliknięciu przycisku okno programu zmienia swój rozmiar na maksymalny i ustawianych jest dziewięć pól informujących o decyzji programu dotyczącej określenia jednego z dziewięciu regionów. Wyświetlany jest też punkt fiksacji wzroku na ekranie w postaci czerwonego krzyżyka.

Opisywane funkcje i interfejs aplikacji w trybie pracy zostały przedstawione na rysunku 6.19.



Rys. 6. 19 Interfejs aplikacji w czasie pracy

Podczas pracy na bieżąco jest wyświetlana informacja o pracy systemu w postaci ilości odrzucanych ramek. W przypadku stwierdzenia zbyt wysokich wartości należy przerwać pracę z programem i dokonać poprawy zewnętrznych warunków pracy i konfiguracji. Na dużą ilość odrzucanych ramek ma wpływ zbyt duża ilość światła słonecznego w pomieszczeniu lub zbyt dużo ruchów głową użytkownika.

### **Praca z programem**

W celu rozpoczęcia pracy niezbędna jest konfiguracja i inicjalizacja kamery. Służy to tego przycisk *Init*. W celu przeprowadzenia procedury konfiguracji najpierw wybieramy z listy wyboru kamerę, z którą chcemy pracować. Następnie w oknie parametrów obrazu wybieramy żadaną rozdzielczość – 800x600 pikseli. Po wstępnej konfiguracji aplikacja jest gotowa do pracy. Jeżeli użytkownik nie pewności, że jego pozycja przed monitorem jest właściwa lub kamera jest ustawiona poprawnie może, w celu weryfikacji, kliknąć przycisk *oświetl* i uruchomić zewnętrzną aplikację wyświetlającą strumień wideo z kamery i zobaczyć aktualną zawartość kadru kamery. Przed rozpoczęciem pracy należy również użyć przycisku *ustaw pola*, w celu przygotowania aplikacji do wyświetlania wyników pomiaru punktu fiksacji.

Po zakończeniu pracy należy kliknąć przycisk *Exit* w celu zamknięcia programu.

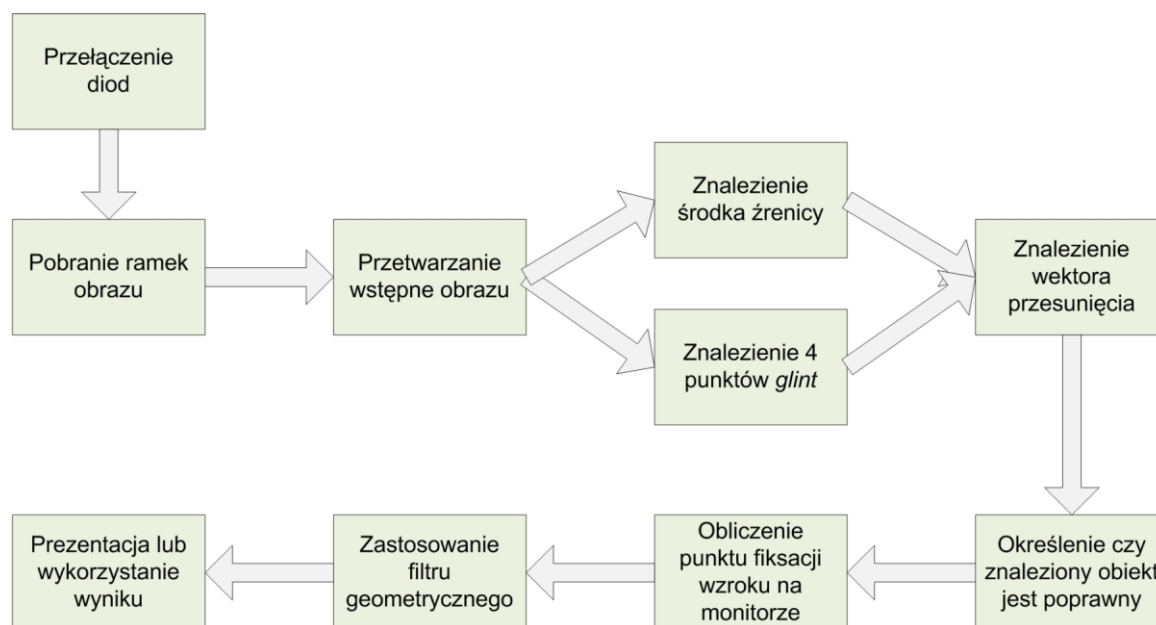
## **6.2.3 Wykorzystane narzędzia i środowisko programistyczne**

Wykonana aplikacja jest wersją prototypową otwartą na modyfikacje, które miałyby ją przystosować do funkcjonalnego systemu użytkowego, np. systemu badania koncentracji uwagi lub interfejsu typu HCI (*Human-Computer Interaction*)[26]. Z tego względu istotny jest opis sposobu działania i charakterystyki oprogramowania pod kątem programistycznym.

Aplikacja została napisana w języku C++ w środowisku programistycznym Microsoft Visual Studio. Algorytmy współpracy z kamerą internetową i przetwarzania obrazu oparte są funkcje biblioteki *Intel OpenCV* [35]. Część funkcji dotyczących przetwarzania obrazu stanowią również funkcje autorskie.

## 6.2.4 Algorytm działania aplikacji

Na funkcjonowanie opisywanej aplikacji etapów składa się kilka etapów, każdy kolejny etap wykorzystuje dane, które zostały wygenerowane w poprzednim etapie. Suma etapów stanowi integralną całość, która składa się na pojedyncze wykonanie algorytmu i wyznaczenie punktu fiksacji. Schemat algorytmu został przedstawiony na rysunku 6.20.



Rys. 6. 20 Schemat algorytmu działania aplikacji

Poniżej przedstawiono ogólny opis działania aplikacji, szczegółowe opisy kolejnych etapów i zastosowanych w nich algorytmów znajdują się w kolejnych podrozdziałach.

Pierwszym etapem jest komunikacja i sterowanie z warstwą sprzętową. Istotą tego etapu jest zapewnienie dostarczenia do dalszych części algorytmu poprawnych ramek, które algorytm będzie mógł wykorzystać. Po poraniu i zapisaniu w pamięci obrazów kolejnym etapem jest wstępne przetwarzanie obrazu. Efektem działania algorytmów w tym etapie są obrazy różnicowy oraz zawierające obszar zainteresowania (*ROI – Region of Interest*) a także źrenicy po adaptacyjnym progowaniu. Obrazy te są dalej poddawane analizie w celu znalezienia współrzędnych punktów charakterystycznych: środka źrenicy oraz czterech punktów *glint* będących odbiciem na oku światła emitowanego przez diody na rogach ekranu.

Kolejnym etapem jest wyznaczenie wektora przesunięcia między ramkami obrazu różnicowego na podstawie analizy położenia punktów charakterystycznych. Określenie wektora jest kluczowe dla dokładności systemu ze względu na istniejące zawsze przesunięcia głowy na kolejnych ramkach spowodowanych naturalnymi ruchami użytkownika. Po zastosowaniu wektora przesunięcia następuje stwierdzenie czy znaleziony obiekt jest poprawny – czy jest to oko i czy wszystkie punkty charakterystyczne zostały wyznaczone poprawnie. Jeżeli tak, następuje obliczanie współrzędnych punktu fiksacji wzroku na monitorze metodą proporcjonalną. Kolejnym etapem mającym kluczowy wpływ na dokładność systemu jest zastosowanie filtru geometrycznego. Jego zadaniem jest niwelacja zniekształceń geometrycznych, które są wynikiem położenia oka poza oś kamery, odbijaniem się poszczególnych fal emitowanych przez diody od różnych warstw gałki ocznej oraz krzywizną gałki ocznej. Po zastosowaniu filtru wynikiem jest punkt fiksacji wzroku, który jest zaprezentowany na ekranie lub może być wykorzystany przez system operacyjny czy inną aplikację.

#### **6.2.4.1 Współpraca ze sprzętem i pobieranie obrazu z kamery**

Zadaniem aplikacji jest zarówno kontrola nad synchronizacją sekcji diod jak i pobieranie do przetwarzania odpowiednich ramek z kamery.

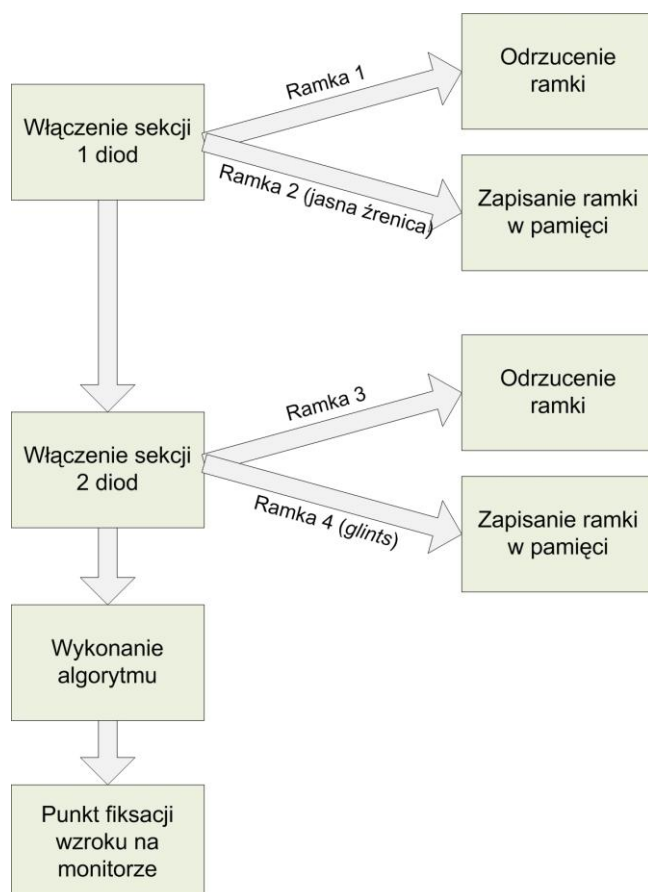
Przełączanie sekcji diod wykonywane jest poprzez sterowanie portem LPT. W zależności od tego, która sekcja diod ma być włączona na port wysyłane jest inny bajt danych. Możliwe jest również zapalenie obu sekcji diod, co zostało zastosowane w funkcji *oświetl* aplikacji.

Implementacja funkcji sterowania portem LPT składa się z inicjalizacji sterownika, która następuje zaraz po uruchomieniu aplikacji oraz z właściwej funkcji wysyłania danych do portu. Sterowanie portem zostało wykonane w środowisku *Assembler*, bezpośrednio wykonując operacje na rejestrach procesora. Implementacja tych funkcji została wykonana na bazie sterownika *giveio*.

Współpraca z kamerą również rozpoczyna się od wstępnej konfiguracji i inicjalizacji urządzenia. Po wybraniu kamery (w przypadku, gdy w systemie zainstalowanych jest więcej kamer) oraz dobraniu rozdzielczości pracy następuje

inicjalizacja kamery. Po tej operacji kamera jest gotowa do rozpoczęcia pracy w każdej chwili.

Pobieranie obrazu z kamery realizowane jest poprzez funkcje interfejsu biblioteki *OpenCV*. Ze względu na kompresję strumienia wideo kodekiem H.264 przetwarzana jest tylko co druga ramka. Zadaniem aplikacji jest decydowanie o tym, czy daną klatkę należy przetwarzać czy odrzucić. Schemat działania algorytmu przełączania diod przedstawiony został na rysunku 6.21.



Rys. 6. 21 Schemat algorytmu akwizycji obrazu z kamery

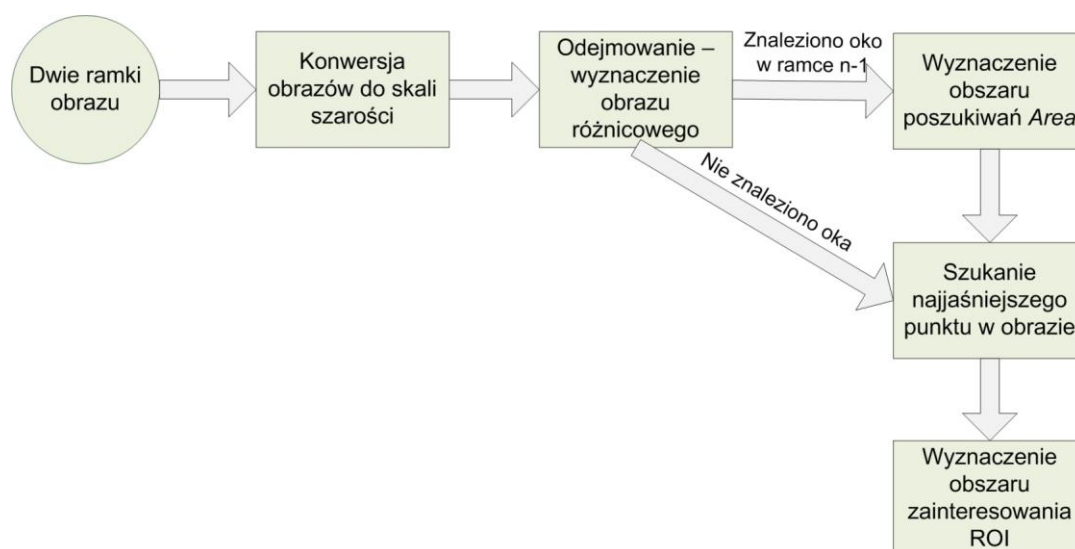
### Opóźnienia w przesyłaniu ramek z kamery do pamięci

Wykorzystywanie synchronizacji programowej niesie ze sobą ryzyko utracenia synchronizacji i wygenerowanie przez warstwę sprzętową niepoprawnych, innych niż oczekiwane ramek obrazu.

W celu określenia tego ryzyka zostały wykonane pomiary czasu opóźnienia spowodowanego przez bufor systemu. Opóźnienie to jest czasem pomiędzy akwizycją obrazu przez matrycę kamery a znalezieniem się zawartości ramki w pamięci komputera w postaci gotowej do wykorzystania przez algorytm.

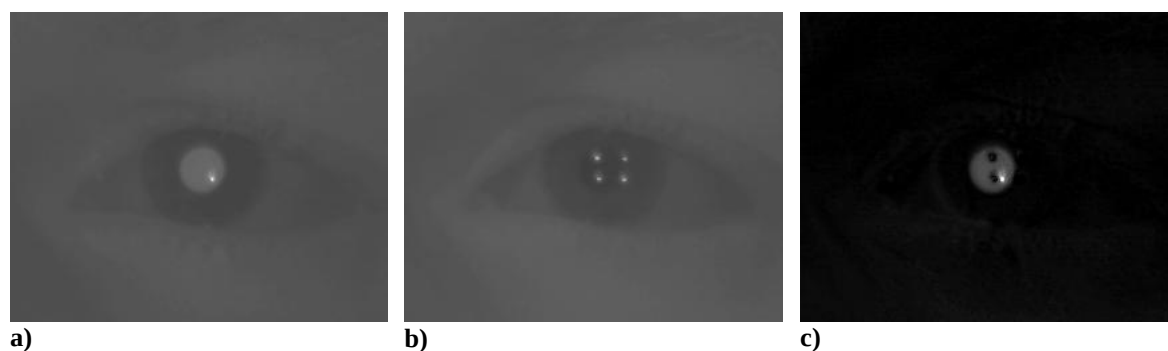
#### 6.2.4.2 Wstępne przetwarzania obrazu

Celem przetwarzania wstępnego obrazu jest znalezienie obszaru zainteresowania w obrazie (*ROI – Region of Interest*), którego będą dotyczyły dalsze prace algorytmu. Ogólny schemat algorytmu przetwarzania wstępnego obrazu został zaprezentowany na rysunku 6.22.



Rys. 6.22 Schemat algorytmu przetwarzania wstępnego obrazu

Dla dwóch ramek z kamery następuje konwersja do skali szarości. Następnie ramki te są od siebie odejmowane w celu uzyskania obrazu różnicowego [28]. Ideę pracy na obrazie różnicowym przedstawia rysunek 6.23.

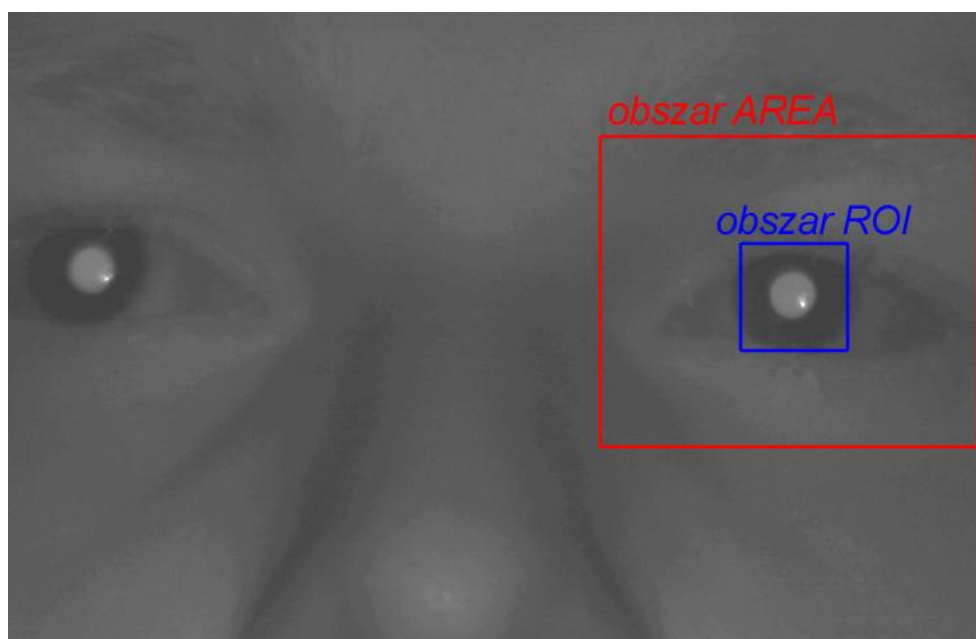


Rys. 6. 23 Praca na obrazie różnicowym: a - obraz bright-eye, b - obraz glints, c - obraz różnicowy.



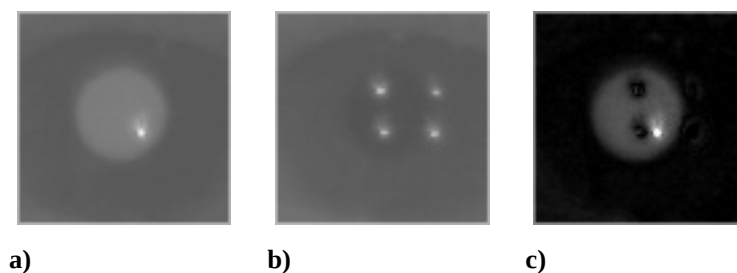
Po wykonaniu odejmowania na ramkach z efektem *bright-eye* oraz *glints* otrzymujemy obraz różnicowy, zawierający pozostałość w postaci obrazu źrenicy. Pewnym defektem są czarne plamy w obrazie różnicowym, będące wynikiem istnienia punktów *glint*, są one jednak naturalnym i nieodłącznym wynikiem tej operacji na obrazie. Warto zauważyć, że odejmowanie ramek nie jest operacją symetryczną – aby algorytm został wykonany poprawnie następuje odjęcie obrazu *glints* od obrazu *bright-eye*.

Po uzyskaniu obrazu różnicowego wykonywane jest poszukiwanie najjaśniejszego punktu. Operacja ta jest wykonywana w zależności od wyniku działania algorytmu dla poprzednich ramek. Jeżeli w poprzednim wykonaniu nie znaleziono poprawnie oka następuje poszukiwanie najjaśniejszego punktu w całym obrazie różnicowym. Jeżeli poprzednio oko zostało znalezione, następuje zawężenie poszukiwań do obszaru *Area*. Po znalezieniu tego punktu następuje wygenerowanie obrazów zawierających tylko obszar źrenicy oka, tzw. obszarów *ROI*. Relacje pomiędzy ramką obrazu, obszarem *Area* i obszarem *ROI* pokazuje rysunek 6.24.



**Rys. 6. 24 Zakres obszarów przetwarzania AREA i ROI**

Na rysunku 6.25 przedstawiono przykładowe, wygenerowane przez algorytm obrazy obszarów *ROI*, dla trzech typów przetwarzanych ramek.



Rys. 6. 25 Obszar ROI obrazu: a – obraz bright-eye, b - obraz glints, c - obraz różnicowy.

Po wyznaczeniu tych obrazów następują dalsze operacje i analiza danych. Zawężenie obszarów skutkuje znacznym zmniejszeniem zasobów niezbędnych do wykonania algorytmu.

#### 6.2.4.3 Znajdowanie współrzędnych środka źrenicy

Dane wejściowe dla algorytmu znajdowania środka źrenicy stanowią obszary *ROI* zawierające efekt bright-eye oraz obraz różnicowy. Istotą tego etapu jest wyznaczenie współrzędnych środka źrenicy oka. Współrzędne są wyznaczane w układzie współrzędnych wyznaczonym przez obraz *ROI*.

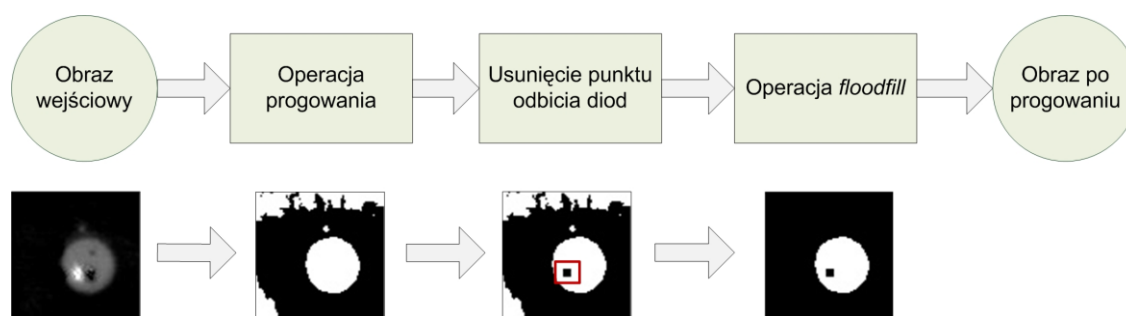
##### Obrazy po operacji progowania

Wykonanie algorytmu związane jest z transformacją obrazu obszaru *ROI*. Istotą tej transformacji jest operacja progowania [23][34] – poszczególne piksele są porównywane z wartością progową. Jeżeli wartość danego piksela jest równą bądź większa od progu, na obrazie wynikowym wartość punktu o współrzędnych analizowanego piksela jest zaznaczana jako maksymalna. Jeżeli wartość badanego piksela jest mniejsza od wartości progowej, jest to oznaczane na obrazie wynikowym jako zero.

Następnie w obrazie zerowane są piksele w miejscu, w którym wystąpiło odbicie diod podczerwonych. Gdy punkt odbicia znajduje się na krawędzi kształtu źrenicy, istnienie tych pikseli w obrazie mogłoby zakłócić wyznaczenie współrzędnych środka źrenicy. Kolejnym etapem jest usunięcie pikseli o wartościach maksymalnych, które nie są bezpośrednio połączone z kształtem wyznaczonym przez obszar źrenicy oka. W tym

celu na obrazie po wstępnym progowaniu wykonywana jest operacja typu *floodfill* [34], która nadaje pikselom znajdującym się w ograniczonym obszarze daną wartość.

Schemat generowanie obrazu progowanego oraz przykładowe wyniki działania algorytmu przedstawia rysunek 26.



Rys. 6. 26 Algorytm transformacji progowania obrazu

### Algorytmy wyznaczania współrzędnych środka źrenicy

W ramach prac projektowych zostało zaproponowanych i przebadanych kilka propozycji algorytmu wykonującego żądane operacje. Szczegółowe wyniki badań zostały przedstawione w rozdziale 6.3. Zaproponowane algorytmy to:

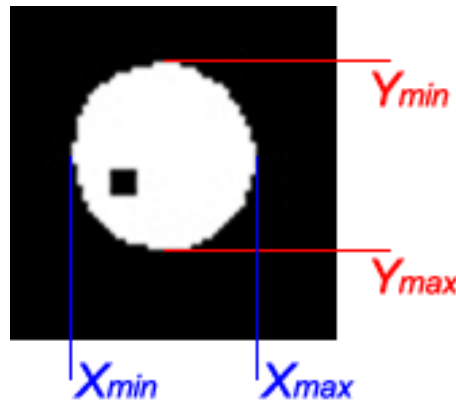
- algorytm oparty na obliczeniach arytmetycznych (dwie wersje)
- algorytm oparty na projekcji obrazu (dwie wersje)
- algorytm oparty na znajdowaniu środka ciężkości w obrazie *bright-eye* (dwie wersje)
- algorytm oparty na znajdowaniu środka ciężkości w obrazie różnicowym (trzy wersje)

W dalszej części podrozdziału zostały szczegółowo opisane poszczególne algorytmy wyznaczania środka źrenicy.

### Algorytm oparty na obliczeniach arytmetycznych

Koncepcja tego algorytmu zakłada, że środek źrenicy można wyznaczyć obliczając średnią arytmetyczną współrzędnych skrajnych punktów obiektu, który powstał w wyniku wygenerowania obrazu progowanego. Dla współrzędnej horyzontalnej należy wziąć pod uwagę współrzędne horyzontalne punktów skrajnych punktów w

obszarze kształtu źrenicy, wysuniętych najbardziej na lewo i najbardziej na prawo. Dla współrzędnej wertykalnej analogicznie bierzemy pod uwagę współrzędne punktów najbardziej wysuniętych w kierunku góry i dołu obrazu. Opisywane operacje zostały przedstawione na rysunku 6.27.



Rys. 6. 27 Skrajne punkty maski źrenicy

Wartości współrzędnych obliczamy wg następujących wzorów.

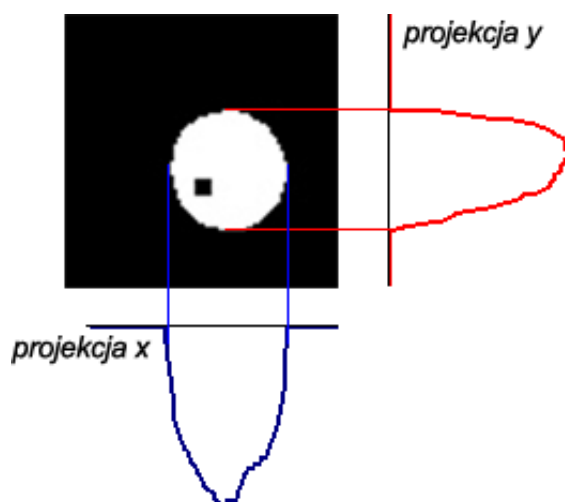
$$X = X_{\min} + \frac{X_{\max} - X_{\min}}{2} \quad (6.1)$$

$$Y = Y_{\min} + \frac{Y_{\max} - Y_{\min}}{2} \quad (6.2)$$

W ramach badań zostały zaimplementowane i przetestowane dwie odmiany tego algorytmu. Wersje różnią się obrazem źródłowym, który jest poddawany progowaniu i przetwarzaniu. Jedna wersja polega na przetwarzaniu obrazu *bright-eye*, druga na przetwarzaniu obrazu różnicowego. Zaletą obrazu *bright-eye* jest nienaruszony kształt źrenicy, w porównaniu do obrazu różnicowego, który zawiera artefakty związane z występowaniem punktów *glint* na powierzchni źrenicy. Jednak w wyniku badań stwierdzono, że wyniki uzyskane w drodze analizy obrazu różnicowego charakteryzują się większą dokładnością.

### Algorytm oparty na projekcji obrazu

Mechanizm projekcji polega na obliczaniu sum wartości pikseli dla każdego wiersza lub kolumny obrazu [5]. Algorytm wyznaczaniu punktu środka źrenicy analizuje wyznaczone wektory projekcji horyzontalnej i wertykalnej i wyznacza maksima tych projekcji. Metoda działania algorytmu została zaprezentowana na rysunku 6.28.



Rys. 6. 28 Wykonanie projekcji horyzontalnej i wertykalnej na obrazie źrenicy

Dla tej metody wyznaczania współrzędnych punktu środka źrenicy również zbadano dwie wersje. Pierwsza odmiana algorytmu polega na obliczaniu wartości projekcji dla obrazu różnicowego, na którym wykonano operację progowania. Dodatkowo braki w kształcie źrenicy zostały uzupełnione białymi pikselami. Druga odmiana polega na obliczaniu projekcji obrazu bright-eye tylko dla pikseli, których wartość w obrazie różnicowym po progowaniu jest maksymalna.

Skuteczność obu metoda okazała się jednak bardzo niska.

### Algorytm oparty na znajdowaniu środka ciężkości w obrazie *bright-eye*

Algorytm ten polega na obliczaniu środka ciężkości (*COG – Center of Gravity*) obiektu, jakim jest źrenica oka. Źródłem danych do obliczenia środka ciężkości jest obraz *bright-eye*. Analiza danych jest wykonywana tylko dla tych pikseli, dla których wartość w obrazie różnicowym po progowaniu jest maksymalna.

Obliczanie środka ciężkości polega na obliczaniu momentów obszarowych obiektu [2]. Należy wyznaczyć moment rzędu zerowego  $m_0$  oraz dwa momenty rzędu pierwszego  $m_x$  i  $m_y$ . Współrzędne środka ciężkości możemy wtedy wyznaczyć jako:

$$x = \frac{m_x}{m_0} \quad (6.3)$$

$$y = \frac{m_y}{m_0} \quad (6.4)$$

Dla obrazu o wartościach dyskretnych punktów danych niezbędne momenty statystyczne można wyznaczyć korzystając z zależności:

$$m_0 = \sum_x \sum_y v(x, y) \quad (6.5)$$

$$m_x = \sum_x \sum_y x \cdot v(x, y) \quad (6.6)$$

$$m_y = \sum_x \sum_y y \cdot v(x, y) \quad (6.7)$$

gdzie  $v(x,y)$  – wartość piksela o współrzędnych  $(x,y)$ .

W ramach badań zostały przeanalizowane dwie koncepcje algorytmu. Pierwsza koncepcja została opisana powyżej, natomiast druga została zmodyfikowana. Zakres obliczania środka ciężkości uległ rozszerzeniu o daną wielkość, w stosunku do obszaru kształtu źrenicy na obrazie po progowaniu.

Modyfikacja pierwotnej wersji algorytmu nie sprawdziła się, wyniki uzyskane tą metodą charakteryzowały się mniejszą skutecznością.

### **Algorytm oparty na znajdowaniu środka ciężkości w obrazie różnicowym**

Koncepcja tego algorytmu jest bardzo podobna do opisywanego powyżej algorytmu opartego o analizę obrazu *bright-eye*. W tej wersji źródłem danych do obliczania środka ciężkości jest obraz różnicowy.

Zostały zbadane trzy modyfikacje tego algorytmu. Oryginalna wersja polega na analizie obszaru *ROI* obrazu różnicowego. Pierwsza modyfikacja polega na obliczaniu pierwszych momentów kwadratów wartości pikseli, zgodnie ze wzorami:

$$m_x = \sum_x \sum_y x^2 \cdot v(x, y) \quad (6.8)$$

$$m_y = \sum_x \sum_y y^2 \cdot v(x, y) \quad (6.9)$$

gdzie  $v(x,y)$  – wartość piksela o współrzędnych  $(x,y)$ .

Druga modyfikacja polegała na obliczaniu pierwszych momentów pierwiastków wartości pikseli, według następujących zależności:

$$m_x = \sum_x \sum_y \sqrt{x} \cdot v(x, y) \quad (6.10)$$

$$m_y = \sum_x \sum_y \sqrt{y} \cdot v(x, y) \quad (6.11)$$

gdzie  $v(x,y)$  – wartość piksela o współrzędnych  $(x,y)$ .

W wyniku badań okazało się, że modyfikacje negatywnie wpływają na skuteczność algorytmu.

### Podsumowanie

Badania nad wszystkimi koncepcjami algorytmu zostały szczegółowo opisane w rozdziale 6.3. W wyniku tych badań stwierdzono, że najskuteczniejszym jest algorytm oparty o wyznaczanie środka ciężkości w obrazie różnicowym i ten algorytm został zaimplementowany w ostatecznej wersji systemu.

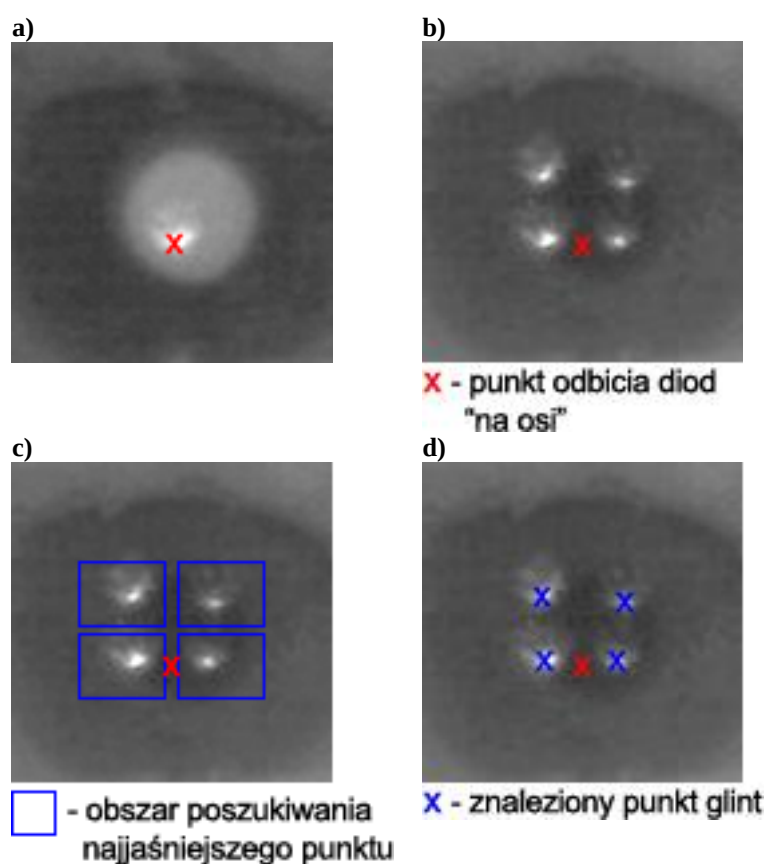
#### 6.2.4.4 Znajdowania punktów charakterystycznych *glint*

Kolejny etap działania aplikacji polega na znalezieniu współrzędnych czterech punktów charakterystycznych tzw. *glint*. Punkt *glint* jest miejscem bezpośredniego odbicia światła emitowanego przez diody LED od powierzchni oka [9].

Algorytm poszukiwania czterech punktów charakterystycznych opiera się na zbadanej zależności, że punkty te pozostają zawsze w określonych relacjach

odległościowych w stosunku do punktu odbicia światła z diod LED umieszczonych w sekcji „na osi” kamery. Współrzędne tego punktu pobierane są z obrazu *bright-eye*. Rozmiary obszarów poszukiwania punktów glint są określane adaptacyjnie przez parametry związane z estymowaną średnicą źrenicy oka, co eliminuje wpływ skalowania obrazu na relacje odległości pomiędzy punktami.

Opisywany algorytm został przedstawiony na rysunkach 6.29.



Rys. 6. 29 Wyszukiwanie punktów glint w obrazie ROI: a - znalezienie punktu odbicia diod "na osi", b - obraz glints, c - obszary poszukiwania punktów glint, d - znalezione punkty glint.

Weryfikacja działania algorytmu wykazała wysoką skuteczność w wyznaczaniu punktów charakterystycznych *glint*. Z tego względu opisywana metoda została zaimplementowana w finalnej wersji oprogramowania.



#### 6.2.4.5 Określanie wektora przesunięcia między ramkami

Sposób działania systemu oparty jest o przetwarzanie obrazu różnicowego, który powstaje jako różnica pomiędzy dwoma kolejnymi ramkami uzyskanymi z kamery. Między pobraniem pierwszej i drugiej ramki występuje niezerowe opóźnienie czasowe spowodowane ograniczonymi możliwościami kamery w kwestii akwizycji obrazu.

Opisywane opóźnienie czasowe w połączeniu z naturalnymi skłonnościami człowieka do wykonywania delikatnych, bezwarunkowych ruchów ciałem może być skutkiem przesunięcia w kadrze analizowanego obiektu, czyli oka [1]. Już najmniejsze przesunięcie może powodować znaczne błędy. Orientacyjne wartości tych błędów zostały pokazane na wykresie 6.2. Wykres został stworzony przy założeniu, że średnica źrenicy oka wynosi 6mm, a obszar roboczy zawierający punkty *glint* zajmuje połowę powierzchni źrenicy.

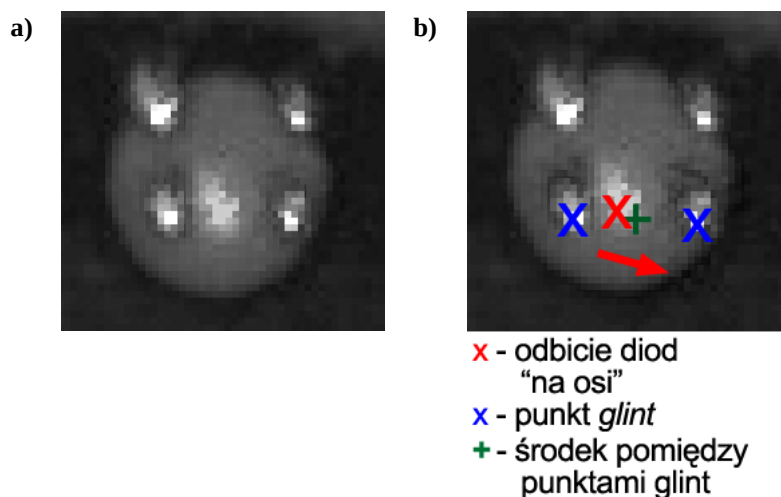


**Wykres 6. 2 Błąd wyznaczania punktu fiksacji w zlaężność od przesunięcia położenia oka**

Analizując wykres można stwierdzić, że przy przesunięciu głowy o wielkość powyżej 2mm system traci możliwość skutecznego funkcjonowania. Aby zapobiec niedokładnościom został zaprojektowany algorytm określania wektora przesunięcia między ramkami. Algorytm ten jest w stanie niwelować nieznaczne ruchy użytkownika zapewniając znaczny wzrost dokładności systemu.

### Algorytm korekcji przesunięć obrazu między ramkami

Celem działania algorytmu jest korekcja znalezionej punktu środka źrenicy tak, aby zniwelować przesunięcie głowy użytkownika zarejestrowanej w dwóch kolejnych ramkach. Koncepcja algorytmu zakłada porównanie obszarów *ROI* obu obrazów i znalezionych na tych obrazach punktów charakterystycznych. Porównanie dokonywane jest pomiędzy znalezionym odbiciem diod „na osi” a dwoma punktami *glint* odpowiedzialnymi za odbicia dolnych diod z sekcji na rogach ekranu. Adekwatnie do rozmieszczenia przestrzennego kamery i diod punkt odbicia na źrenicy sekcji diod „na osi” powinien znajdować się w równej odległości od obu dolnych punktów *glint*. Sposób określania wektora przesunięcia ilustruje rysunek 6.30.



Rys. 6. 30 Wyznaczanie wektora przesunięcia: a - nałożona na siebie obrazy bright-eye i glints, b - wyznaczony wektor przesunięcia

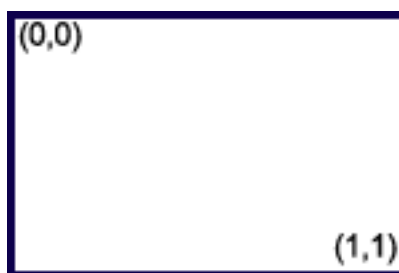
Wartości określonego w powyżej opisany sposób wektora przesunięcia są wykorzystywane do korekcji określonych współrzędnych środka źrenicy. Korekcja ta ma bardzo korzystny wpływ na dokładność systemu i może skutecznie niwelować delikatne ruchy użytkownika. Szczegółowe testy dokładności opisywanego algorytmu zostały przedstawione rozdziale 6.3.

### 6.2.4.6 Obliczanie punktu fiksacji

Określanie punktu fiksacji wzroku jest kluczowym etapem algorytmu całego systemu. Określenie współrzędnych tego punktu jest dokonywane na podstawie:

- współrzędnych punktu środka źrenicy
- współrzędnych czterech punktów charakterystycznych *glint*
- wektora przesunięcia między ramkami

Charakter obliczania współrzędnych punktu fiksacji na ekranie na podstawie powyższych danych stanowi aparat matematyczny. Wynikiem działania tej funkcji są dwie współrzędne punktu zawierające się w przedziale wielkości od 0 do 1. W opisie geometrycznym przestrzeni ekranu przyjęto, że lewy górny róg ekranu jest określony przez współrzędne  $(0,0)$  a prawy dolny róg ma współrzędne  $(1,1)$ . Konwencja ta została przedstawiona na rysunku 6.31.



Rys. 6. 31 Konwencja opisywania obszaru ekranu

W celu uzyskania wyniku znalezionej punktu fiksacji wzroku na ekranie określonego we współrzędnych liczonych w pikselach należy odpowiednie współrzędne wyznaczone przez algorytm przemnożyć przez odpowiednio wartość długości lub szerokości ekranu mierzonej w pikselach. Charakter tej operacji przedstawiają równania:

$$x_{screen} = x_{out} \cdot w_{screen} \quad (6.12)$$

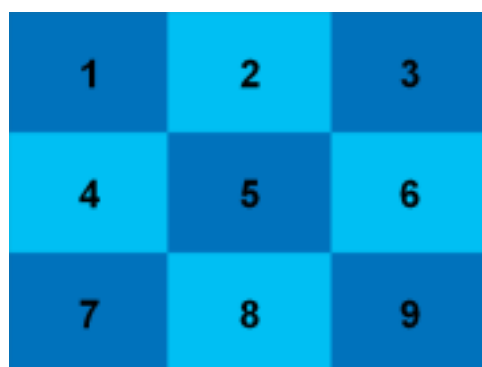
$$y_{screen} = y_{out} \cdot h_{screen} \quad (6.13)$$

gdzie:  $x_{out}, y_{out}$  - wyznaczone współrzędne punktu fiksacji;  $w_{screen}, h_{screen}$  - parametry rozdzielczości ekranu w pikselach,  $x_{screen}, y_{screen}$  - wynik na ekranie

W ramach badań zaprojektowano i dokonano weryfikacji dwóch algorytmów matematycznych obliczających punkt fiksacji wzroku: algorytm oparty o analizę odległości pomiędzy punktami charakterystycznymi oraz algorytm korzystający z proporcjonalnych zależności pomiędzy tymi punktami. Poniżej dokładnie opisano każdy z tych algorytmów.

### Algorytm odległości

Wynikiem działania tego algorytmu jest decyzja o przyporządkowaniu punktu fiksacji wzroku do jednego z dziewięciu regionów ekranu. Podział ekranu na regiony został dokonany jak na rysunku 6.32.



Rys. 6.32 Podział ekranu na regionów

Istotą tej metody jest określenie długości odległości pomiędzy wyznaczonym punktem środka źrenicy skorygowanym o wektor korekcji przesunięć a każdym z czterech punktów *glint*. Obliczanie tych odległości wykonywane jest według wzoru:

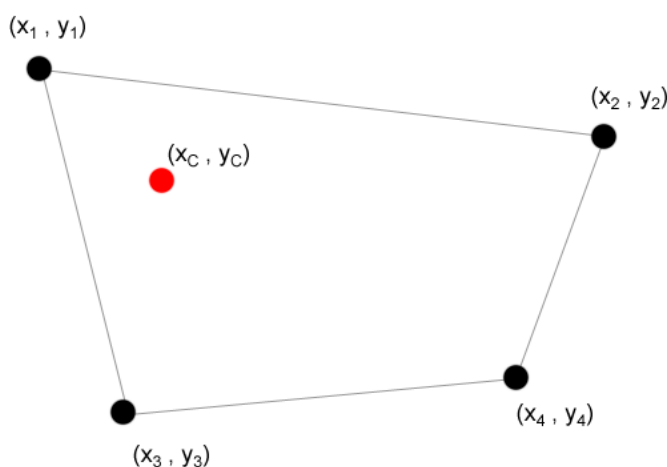
$$o = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (6.14)$$

Po obliczeniu każdej z czterech odległości wykonywana jest ich analiza, polegająca na porównywaniu tych odległości z odpowiednimi wagami. Na tej podstawie generowany jest wynik w postaci numeru regionu na ekranie.

## Algorytm proporcjonalny

W tym algorytmie zwracanym wynikiem są współrzędne punktu fiksacji wzroku na ekranie. Koncepcja algorytmu zakłada, że współrzędne punktu na ekranie pozostają w takich samych relacjach z rogami ekranu jak skorygowane współrzędne punktu środka źrenicy z czterema punktami *glint*. Algorytm ma charakter iteracyjny, w kolejnej iteracji wyznaczany jest wynikowy punkt z coraz większą dokładnością.

Przykładowe relacje na powierzchni oka pomiędzy punktem środka źrenicy a punktami glint są przedstawia rysunek Rys. 6. 33.



Rys. 6. 33 Opis punktów charakterystycznych na powierzchni oka

Zgodnie z opisem punktów na rysunku 6.33 operacje matematyczne przebiegają według następującego schematu. W pierwszej iteracji wstępnie wyznaczana jest współrzędna horyzontalna  $x$  zgodnie z następującym wzorem:

$$x_{out} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{x_C - x_1}{x_2 - x_1} + \frac{x_C - x_3}{x_4 - x_3} \right) \quad (6.15)$$

Kolejne iteracje algorytmu są wykonywane według wzorów:

$$y_{out} = (1 - x_{out}) \cdot \left( \frac{y_C - y_1}{y_3 - y_1} \right) + x_{out} \cdot \left( \frac{y_C - y_2}{y_4 - y_2} \right) \quad (6.16)$$

$$x_{out} = (1 - y_{out}) \cdot \left( \frac{x_C - x_1}{x_2 - x_1} \right) + y_{out} \cdot \left( \frac{x_C - x_3}{x_4 - x_3} \right) \quad (6.17)$$

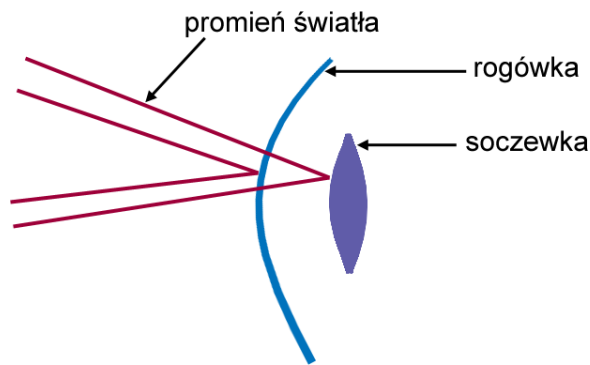
W wyniku wykonania tego algorytmu otrzymujemy współrzędne znormalizowane tak jak to zostało opisane na początku podrozdziału. Ze względu na stosunkowo niewielkie zniekształcenia geometryczne odbicia na powierzchni źrenicy algorytm ten okazał się wystarczająco skuteczny i został zaimplementowany w finalnej wersji opisywanego systemu.

#### 6.2.4.7 Korekcja wyznaczonego punktu fiksacji przez filtr geometryczny

Opisane dotąd etapy mechanizmu wyznaczania punktu fiksacji wzroku nie uwzględniają zniekształceń spowodowanych zależnościami geometrycznymi pomiędzy obiektami systemu a użytkownikiem. Istotą korekcji przez filtr geometryczny jest usunięcie tych zniekształceń. Korekcja geometryczna skupia się na dwóch rodzajach zniekształceń:

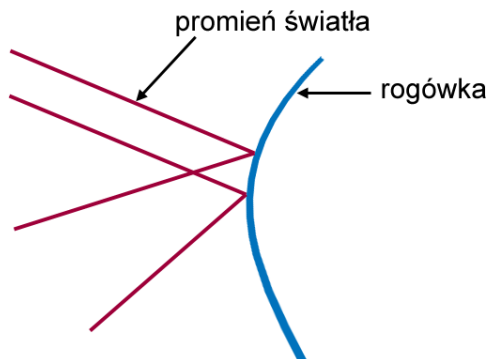
- zniekształcenia spowodowane odbiciami poszczególnych promieni światła od różnych płaszczyzn w oku
- zniekształcenia spowodowane kulistą krzywizną powierzchni oka.

Pierwszy typ zniekształceń powoduje to, że punkty glint stanowią odbicia światła od powierzchni rogówki oka, natomiast podłożem efektu jasnej źrenicy jest odbicie od jądra soczewki. Ten ty zniekształceń powoduje tym większy błąd im oko znajduje się dalej od środka kadru kamery. Zjawisko to ilustruje rysunek 6.34.



**Rys. 6. 34 Zjawisko odbicia od różnych warstw oka**

Drugi typ zniekształceń to błędy spowodowane kulistą krzywizną powierzchni rogówki oka. Zgodnie z prawem odbicia światło odbijane jest pod takim samym kątem jak kąt pomiędzy promieniem padającym a płaszczyzną padania w danym punkcie. Zgodnie z tym prawem promienie równoległe padające na różne fragmenty płaszczyzny będą odbijane pod różnymi kątami. Zniekształcenia te dotyczą promieni światła pochodzącego od diod z sekcji na rogach ekranu. Ze względu na odległości między nimi padają one na powierzchnię rogówki w różnych miejscach i odbijają się pod różnymi kątami. Opisane zjawisko ilustruje rysunek 6.35.



**Rys. 6. 35 Zjawisko odbicia od powierzchni rogówki oka pod różnymi kątami**

Filtr geometryczny eliminujący wpływ wyżej opisanych zniekształceń na wynik działania systemu ma postać operacji matematycznej. Aplikacja filtra na wynik następuje zgodnie z następującymi wzorami:

dla współrzędnej horyzontalnej,

$$\begin{aligned}
x_{out} = & x + \left( \frac{bp_x}{w_{scr}} - 0,5 \right) \cdot \left( pind_x - \left( 1 - \frac{bp_x}{w_{scr}} - x \right)^2 \cdot pdep_x \right) + \\
& + \left( 1 - \frac{bp_x}{w_{scr}} - x \right) \cdot \left( pcurv_x + \left| \frac{bp_y}{h_{scr}} - y \right| \cdot pcross_x \right)
\end{aligned} \tag{6.18}$$

dla współrzędnej wertykalnej,

$$\begin{aligned}
y_{out} = & y + \left( \frac{bp_y}{h_{scr}} - 0,5 \right) \cdot \left( pind_y - \left( 1 - \frac{bp_y}{h_{scr}} - y \right)^2 \cdot pdep_y \right) + \\
& + \left( 1 - \frac{bp_y}{h_{scr}} - y \right) \cdot \left( pcurv_y + \left| \frac{bp_x}{w_{scr}} - x \right| \cdot pcross_y \right)
\end{aligned} \tag{6.19}$$

gdzie:

$x_{out}, y_{out}$  – współrzędne po korekcji geometrycznej

$x, y$  – współrzędne przed korekcją geometryczną

$bp_x, bp_y$  – współrzędne najjaśniejszego punktu w całym kadrze kamery

$w_{scr}, h_{scr}$  – rozdzielczość obrazu z kamery

$pdep_x, pdep_y$  – parametr „zależny”

$pind_x, pind_y$  – parametr „niezależny”

$pcurv_x, pcurv_y$  – parametr związany z krzywizną oka

$pcross_x, pcross_y$  – parametr zależności krzyżowej zniekształceń

Pierwszy składnik sumy równania stanowi wyznaczona w poprzedzających etapach współrzędna punktu fiksacji. Drugi składnik stanowi wyrażenie eliminujące wpływ zniekształcenia spowodowanego odbiciami od różnych warstw oka. Składa się on z dwóch elementów. Parametr  $pind$  powoduje korekcję wyniku w zależności od położenia oka w kadrze kamery, natomiast parametr  $pdep$  powoduje korekcję również z uwzględnieniem współrzędnej punktu fiksacji.

Trzeci składnik sumy stanowi wyrażenie korygujące wpływ krzywizny powierzchni oka na wynik. W jest skład wchodzi wyrażenie związane z parametrem  $pcurv$  eliminujące proste zniekształcenia oraz wyrażenie związane z parametrem  $pcross$ , które koryguje współrzędną wertykalną w zależności od horyzontalnej i odwrotnie.



W wyniku korekcji geometrycznej system jest w stanie wygenerować optymalny wynik, który jest kompozycją wielu czynników pracujących na jego dokładność.

### **6.2.5 Podsumowanie**

W powyższym podrozdziale opisano aplikację systemu detekcji punktu fiksacji wzroku. Poruszono kwestie dotyczące wymagań środowiska pracy, sposobu pracy z systemem, a także szczegółowo opisano sposób działania algorytmu aplikacji.

Po kolei poruszono wpływ poszczególnych etapów analizy danych na wynik działania systemu. Dla każdego etapu przedstawiono rozpatrywane alternatywne rozwiązania, których badania zostały opisane w rozdziale 6.3. Z poszczególnych opcji realizacji kolejnych etapów wybrano te algorytmy, które zapewniają największą skuteczność i optymalne zapotrzebowanie na zasoby obliczeniowe.

## **6.3 Testy i badania**

W ramach prac nad opisywanym systemem detekcji punktu fiksacji wzroku dokonano licznych badań i testów. Badania miały na celu znalezienie optymalnej ścieżki algorytmu aplikacji. Testy wykonano w celu ilościowego i jakościowego określenia funkcjonalności finalnej wersji systemu.

W poniższym podrozdziale opisano sposób i warunki wykonywania pomiarów, a następnie szczegółowo zostały przedstawione poszczególne prace badawcze i ich wyniki.

### **6.3.1 Warunki wykonywania pomiarów**

Jeżeli w opisie pracy badawczej nie zostało ustanowione inaczej, badania zostały wykonane w opisanych poniżej warunkach.

Opis warstwy sprzętowej:

- Diody LED:
  - ilość diod:
    - 4 diody w sekcji na osi kamery

- 10 diod w sekcji na rogach ekranu (po 3 diody w górnych rogach, po 2 diody w dolnych rogach)
  - warunki prądowe pracy diod: prąd 25mA na każdą diodę; napięcie 1,23V
- Przełączanie i synchronizacja sekcji diod realizowana programowo za pomocą systemu opisywanego w rozdziale 6.1
- Kamera:
  - model Logitech 9000 PRO
  - komunikacja z komputerem przez interfejs USB
  - parametry pracy kamery:
    - rozdzielczość obrazu 800x600 pikseli
    - 15 klatek na sekundę
  - Obiektów o ogniskowej 25mm z filtrem *IR-pass*

Opis systemu komputerowego:

- Komputer PC z konfiguracją:
  - Procesor AMD Athlon XP 2500+
  - 1GB pamięci RAM
- Monitor przekątnej 19 cali, stosunek boków 4:3
- System operacyjny: Windows XP

Opis warunków zewnętrznych:

- Brak światła słonecznego w pomieszczeniu

Warunki wykonywania poszczególnych pomiarów zostały również przedstawione w ramach opisu każdego badania. O ile nie zostało to określone inaczej poszczególne pomiary były wykonywane na podstawie próbek obrazu zapisanych w postaci plików JPEG zawierających obraz z kamery. Taka technologia wykonywania badań była podyktowana niezbędną dla wyciągnięcia wniosków z analizy cech pomiarów jaką jest ich powtarzalność. Technologia prowadzenia badań nie miała wpływu na wyniki.

## **6.3.2 Wyniki badań i analiza wyników**

Poniżej znajduje się opis i wyniki poszczególnych prac badawczych nad opisywanym systemem. Dla każdego badania przedstawiono po kolei ogólny cel i sposób przeprowadzania testu, opis warunków pomiarowych, a następnie wyniki pomiarów i ich analiza.

### **6.3.2.1 Badanie zapotrzebowania na zasoby obliczeniowe w zależności od stopnia optymalizacji algorytmu przetwarzania wstępnego obrazu**

#### **Opis badania**

W ramach tego badania dokonano pomiarów czasu niezbędnego do pojedynczego wykonania algorytmu aplikacji. Badanie miało na celu określenie słuszności dokonywania optymalizacji na tym etapie oraz skuteczności wykonanych optymalizacji.

Badania przeprowadzono dla typów optymalizacji:

- Optymalizacja poprzez włączenie do przetwarzania tylko fragmentu obrazu *AREA* określonego predykcyjnie na podstawie współrzędnych obszaru *ROI* określonych w poprzednim wykonaniu algorytmu
- Optymalizacja algorytmu poprzez przetwarzanie obrazów przetransformowanych do skali szarości

#### **Warunki wykonywania pomiarów**

Badania zostały przeprowadzone dla identycznych konfiguracji sprzętowych komputera oraz przy minimalnym obciążeniu systemu komputerowego. Dalsze etapy algorytmu pozostały w każdym przypadku niezmiennie. Gwarantuje to powtarzalność otrzymywanych wyników. Wyniki każdego z etapów badań zostały wygenerowane jako średnia 100 wyników realizacji algorytmu.

## Wyniki badań

Wyniki badań zostały przedstawione na wykresie 6.3.



Wykres 6. 3 Zapotrzebowanie na zasoby obliczeniowe w zależności od stopnia optymalizacji

### Analiza wyników

Wyniki badań potwierdziły słuszność dokonywania optymalizacji. Warto zwrócić uwagę na wysoką skuteczność dokonanych poprawek, które zmniejszyły zapotrzebowanie na zasoby obliczeniowe o 30%

#### 6.3.2.2 Badanie wpływu kolejnych etapów algorytmu na dokładność aplikacji

##### Opis badania

Przedmiotem badania był wpływ kolejnych etapów algorytmu przetwarzania na dokładność wyniku detekcji punktu fiksacji wzroku. Badanie zostało przeprowadzone w celu określenia celowości podejmowania badań nad algorytmami kolejnych etapów.

W badaniu określono skuteczność wyników poszczególnych etapów bez wykonywania następujących po nich algorytmów. Pomiary wykonano dla etapów:

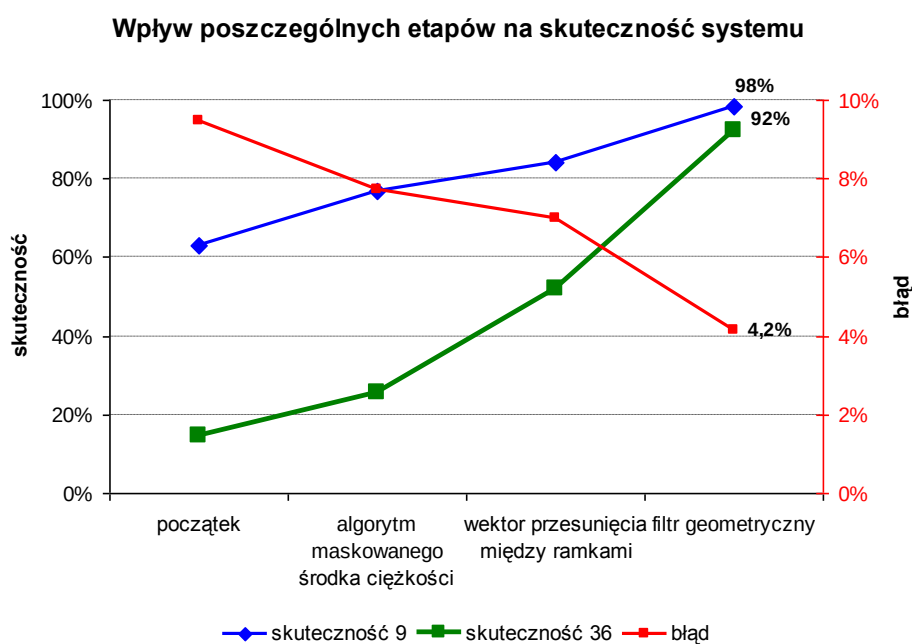
- Początkowe wyznaczenie punktu fiksacji wzroku
- Zastosowanie algorytmu maskowanego środka ciężkości
- Zastosowanie korekcji przez wektor przesunięcia między ramkami
- Zastosowanie filtra geometrycznego

### Warunki wykonywania pomiarów

Badanie zostały wykonane dla identycznych konfiguracji sprzętowych. Testując kolejne etapy, algorytmy następujące po nich były wyłączane z przetwarzania. W ramach badań określono skuteczność poprawności wskazywania jednego z 9 lub 36 regionów ekranu oraz średni błąd wyznaczania punktu fiksacji wzroku podawany w skali procentowej w stosunku do rozmiaru ekranu.

### Wyniki badań

Wyniki badań zostały przedstawione na wykresie 6.4.



**Wykres 6. 4 Wpływ kolejnych etapów algorytmu na dokładność systemu**

## **Analiza wyników**

Wyniki badań potwierdziły celowość implementacji kolejnych etapów algorytmu. Warto zwrócić uwagę na znaczny wzrost skuteczności po zastosowaniu algorytmu korekcji przesunięć między ramkami oraz duże znaczenie algorytmu filtru geometrycznego.

### **6.3.2.3 Badanie algorytmów określania współrzędnych środka źrenicy**

#### **Opis badania**

W badaniu tym dokonano oceny poprawności określania współrzędnych środka źrenicy przez poszczególne algorytmy. Badanie miało na celu określenie, który z algorytmów powinien zostać zaimplementowany w aplikacji. Opis kolejnych algorytmów znajduje się w podrozdziale 6.2. W ramach badania określono dokładność następujących algorytmów:

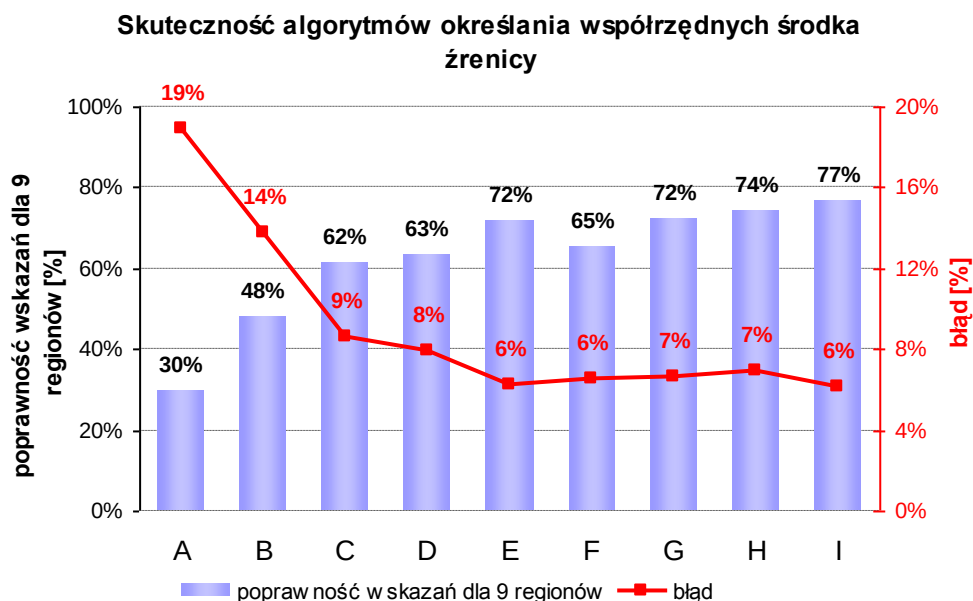
- algorytm oparty na obliczeniach arytmetycznych (dwie wersje)
- algorytm oparty na projekcji obrazu (dwie wersje)
- algorytm oparty na znajdowaniu środka ciężkości w obrazie *bright-eye* (wersja oryginalna i analiza powiększonego obszaru danych)
- algorytm oparty na znajdowaniu środka ciężkości w obrazie różnicowym (wersja oryginalna, poszukiwanie środka ciężkości kwadratów sum, poszukiwanie środka ciężkości pierwiastków sum)

#### **Warunki wykonywania pomiarów**

Pomiary zostały wykonane dla algorytmu przetwarzania danych nie obejmującego etapów następujących po etapie badanym. Dzięki temu na wyniki prac nie mają wpływu kolejne operacje, a same wyniki są porównywalne. Badanie zostało przeprowadzone na 960 próbkach w optymalnych warunkach zewnętrznych.

#### **Wyniki badań**

Wyniki badań zostały przedstawione na wykresie 6.5.



**Wykres 6.5 Porównanie algorytmów wyznaczania środka źrenicy**

Opis akronimów poszczególnych algorytmów:

A - algorytm oparty na projekcji obrazu obszaru *ROI* po progowaniu

B - algorytm oparty na projekcji obszaru *ROI* obrazu *bright-eye* przy maskowaniu obrazem różnicowym po progowaniu

C - algorytm oparty na obliczeniach arytmetycznych na podstawie obrazu *bright-eye* po progowaniu

D - algorytm oparty na obliczeniach arytmetycznych na podstawie obrazu różnicowego po progowaniu

E - algorytm oparty na znajdowaniu środka ciężkości w obrazie *bright-eye* przy maskowaniu obrazem różnicowym po progowaniu

F - algorytm oparty na znajdowaniu środka ciężkości w obrazie *bright-eye* dla powiększonego obszaru danych przy maskowaniu obrazem różnicowym po progowaniu

G - algorytm oparty na znajdowaniu środka ciężkości pierwiastków sum w obrazie różnicowym przy maskowaniu obrazem różnicowym po progowaniu

H - algorytm oparty na znajdowaniu środka ciężkości kwadratów sum w obrazie różnicowym przy maskowaniu obrazem różnicowym po progowaniu

I - algorytm oparty na znajdowaniu środka ciężkości w obrazie różnicowym przy maskowaniu obrazem różnicowym po progowaniu

## **Analiza wyników**

Na podstawie wyników badań stwierdzono, że najskuteczniejszym algorytmem określania współrzędnych środka źrenicy jest algorytm oparty na znajdowaniu środka ciężkości w obrazie różnicowym przy maskowaniu obrazem różnicowym po progowaniu. Ten algorytm został zaimplementowany w aplikacji systemu.

### **6.3.2.4 Badanie algorytmów wyznaczania punktu fiksacji**

#### **Opis badania**

W badaniu tym dokonano oceny skuteczności algorytmów matematycznych określania regionu odpowiedniego dla punktu fiksacji wzroku na monitorze. W ramach badania określono dokładność dwóch algorytmów:

- algorytm proporcjonalny, iteracyjny
- algorytm oparty na analizie odległości pomiędzy punktami charakterystycznymi

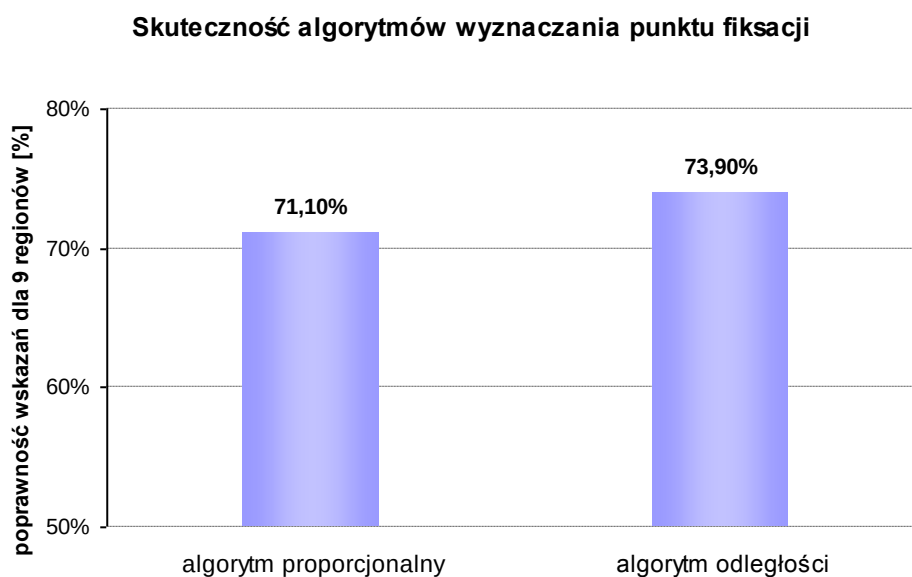
#### **Warunki wykonywania pomiarów**

Pomiary zostały wykonane dla algorytmu przetwarzania danych nie obejmującego etapów następujących po etapie badanym. Dzięki temu na wyniki prac nie mają wpływu kolejne operacje, a same wyniki są porównywalne. Badanie zostało przeprowadzone na 960 próbkach w optymalnych warunkach zewnętrznych.

#### **Wyniki badań**

Wyniki badań zostały przedstawione na wykresie 6.6.





**Wykres 6. 6 Porównanie algorytmów wyznaczania punktu fiksacji wzroku**

### **Analiza wyników**

Na podstawie wyników przeprowadzonych prac badawczych stwierdzono, że algorytm oparty o analizę odległości wykazuje lepszą skuteczność niż algorytm proporcjonalny, jednak różnica nie jest duża i wynosi 2,8 pp. W aplikacji systemu zastosowano jednak algorytm proporcjonalny ze względu na charakter wyniku algorytmu, którym są współrzędne punktu na ekranie. Decyzja ta była podyktowana możliwościami, które oferuje ten charakter wyniku – pozwala on na zastosowanie kolejnych etapów przetwarzania danych, które pozytywnie wpływają na skuteczność systemu. Wynik oparty na współrzędnych pozwala również na bardziej efektywne prezentowanie i wykorzystanie wykrytego punktu fiksacji wzroku.

### **6.3.2.5 Badanie skuteczności filtru geometrycznego**

#### **Opis badania**

W ramach tego badania określono wpływ filtru geometrycznego na skuteczność systemu. Dokonano również weryfikacji poszczególnych elementów wchodzących w

skład algorytmu matematycznego filtru geometrycznego. Wyniki badań przedstawiają wpływ na skuteczność:

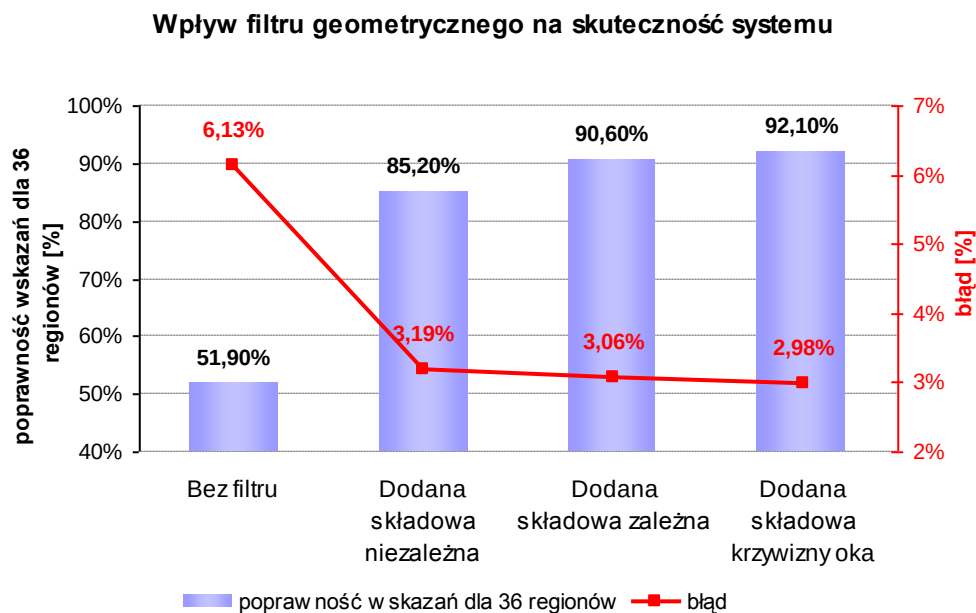
- pełnej wersji filtru geometrycznego
- składnika niezależnego od punktu fiksacji wzroku
- składnika zależnego od punktu fiksacji wzroku
- składnika eliminującego negatywny wpływ krzywizny oka na wynik

### Warunki wykonywania pomiarów

Badanie zostało przeprowadzone na 900 próbkach w warunkach zewnętrznych optymalnych. Parametry stałych algorytmu zostały dobrane w sposób eksperymentalny tak, aby zapewnić największą skuteczność systemu.

### Wyniki badań

Wyniki badań zostały przedstawione na wykresie 6.7.



Wykres 6. 7 Wpływ filtru geometrycznego na skuteczność systemu

## **Analiza wyników**

Wyniki badań potwierdzają duże znaczenie filtru korekcji geometrycznej na dokładność systemu. Największy wpływ mają składowe eliminujące wpływ odbić od różnych warstw oka. Wpływ korekcji krzywizny oka ma charakter kosmetyczny.

### **6.3.2.6 Badanie wpływu ruchów głowy użytkownika na funkcjonalność systemu**

#### **Opis badania**

W ramach tego badania określono wpływ sposobu interakcji użytkownika z systemem na jego funkcjonalność. Badanie polegało na przeanalizowaniu wyników działania systemu dla przypadków, gdy:

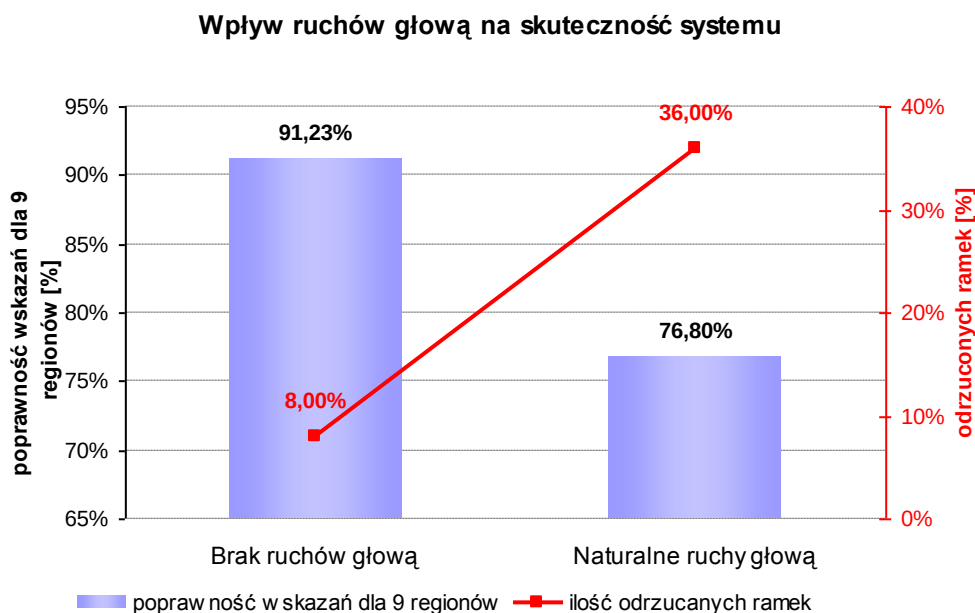
- użytkownik nie wykonuje ruchów głową (na tyle na ile jest to fizjologicznie wykonalne)
- użytkownik wykonuje delikatne, naturalne ruchy głową związane ze zmianą punktu fiksacji wzroku

#### **Warunki wykonywania pomiarów**

Badanie zostało wykonane na dwóch zestawach próbek danych. Zbiory danych liczyły 900 próbek dla warunków bez ruszania głową oraz 960 próbek dla warunków z naturalnymi ruchami głowy. Wyniki badań uwzględniają pozytywny wpływ algorytmu korekcji przesunięć.

#### **Wyniki badań**

Wyniki badań zostały przedstawione na wykresie 6.8.



**Wykres 6. 8 Wpływ ruchów głową na skuteczność systemu**

### **Analiza wyników**

Na podstawie badań stwierdzono znaczny spadek skuteczności systemu w przypadku zaistnienia ruchów głową. Należy również zwrócić uwagę na duży wzrost liczby odrzucanych przez system ramek przy wykonywaniu ruchów głową. Pomimo zastosowania algorytmów korekcji przesunięć, system charakteryzuje się niską odpornością na zmiany położenia głowy.

### **6.3.2.7 Badania wpływu warunków zewnętrznych na funkcjonalność systemu**

#### **Opis badania**

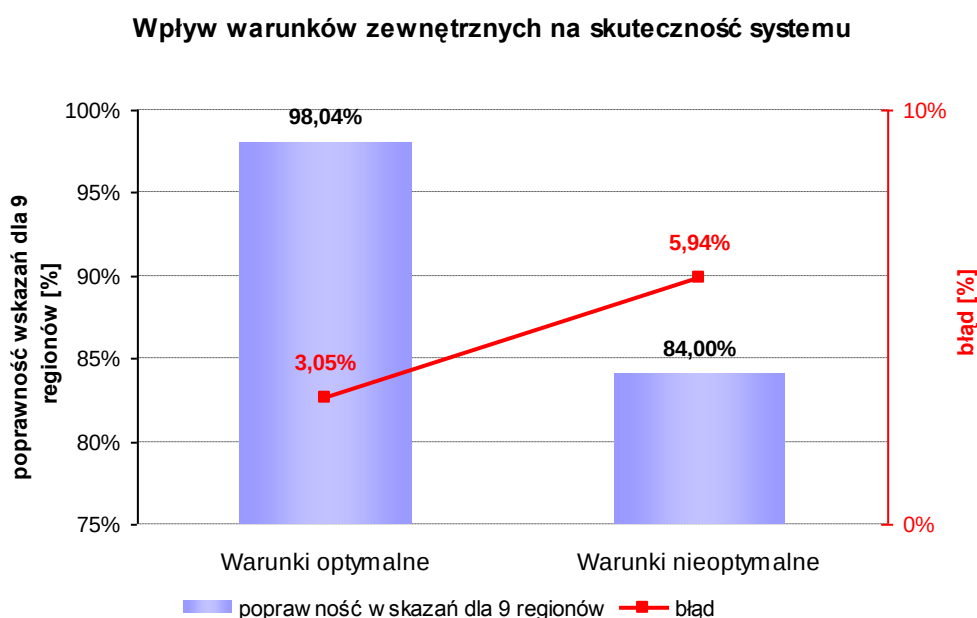
W tym badaniu określono wpływ warunków zewnętrznych w postaci ilości światła słonecznego na skuteczność systemu. Dokonano pomiaru skuteczności dla dwóch rodzajów zbiorów danych: próbek wykonanych w warunkach optymalnych (przy braku oświetlenia słonecznego) oraz próbek wykonanych w dzień z pewną ilością światła słonecznego w pomieszczeniu.

## Warunki wykonywania pomiarów

Badanie zostało przeprowadzone na dwóch reprezentatywnych zbiorach danych liczących 900 próbek dla zdjęć dziennych oraz 922 próbki dla zdjęć nocnych. Wszystkie inne parametry i konfiguracja systemu pozostały takie same w obu badaniach.

## Wyniki badań

Wyniki badań zostały przedstawione na wykresie 6.9.



Wykres 6. 9 Wpływ warunków zewnętrznych na skuteczność systemu

## Analiza wyników

Na podstawie wyników badań stwierdzono znaczny wpływ warunków zewnętrznych na skuteczność systemu. Jest on jednak mniej istotny niż wpływ ruchów głowy. System w niekorzystnych warunkach może stabilnie wykonywać swoje zadania z nieznacznym negatywnym wpływem na funkcjonalność.

### **6.3.2.8 Analiza błędu pomiarowego dla poszczególnych regionów ekranu**

#### **Opis badania**

W ramach tego badania określono rozmiary błędów wyznaczania punktu fiksacji wzroku na ekranie dla poszczególnych regionów i obszarów ekranu. Dokonano również oddzielnej analizy dla błędów wyznaczania współrzędnej horyzontalnej i wertykalnej. Badanie składało się z trzech etapów, w których dokonano analizy wyników odpowiednio dla:

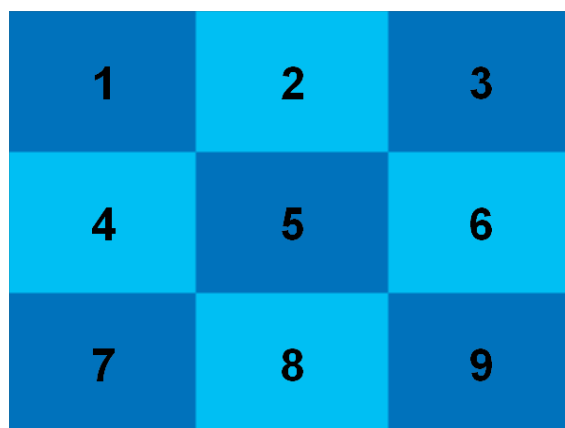
- trzech obszarów ekranu w pionie
- trzech obszarów ekranu w poziomie
- każdego z dziewięciu regionów ekranu

#### **Warunki wykonywania pomiarów**

Badanie zostało przeprowadzone na zbiorze danych liczącym 900 próbek. Badanie zostało wykonane dla oka znajdującego się w lewej części kadru. Dzięki temu zaobserwowano wpływ asymetrii położenia oka na błędy wyznaczania punktu fiksacji w poszczególnych regionach ekranu.

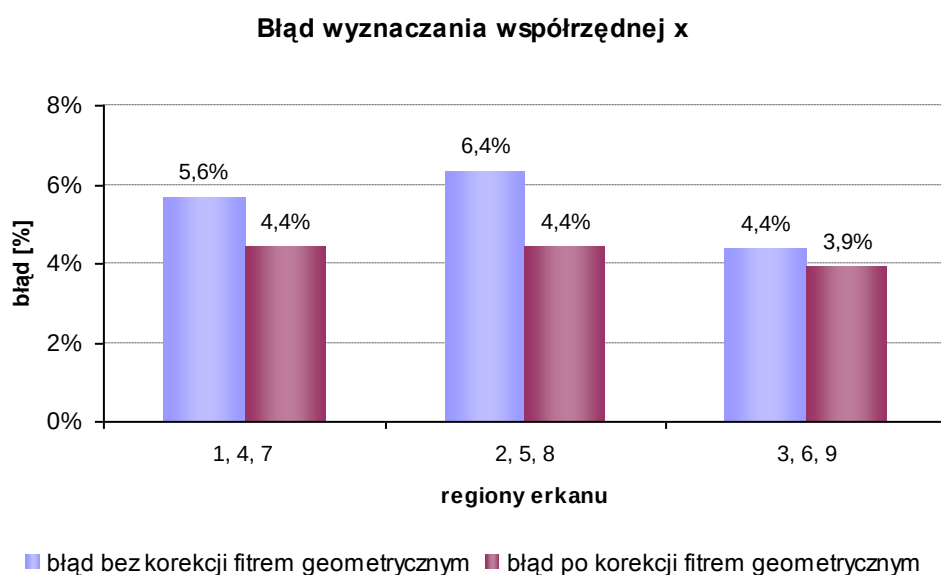
#### **Wyniki badań**

Poniżej przedstawiono wyniki pierwszego etapu badań, średnich błędów dla trzech obszarów utworzona jako suma regionów pokrywających się w pionie. Pierwszy obszar stanowiły regiony 1, 4 i 7, drugi 2, 5 i 8, a trzeci odpowiednio 3, 6 oraz 9. Oznaczenie regionów ekranu jest zgodne z rysunkiem 6.36.



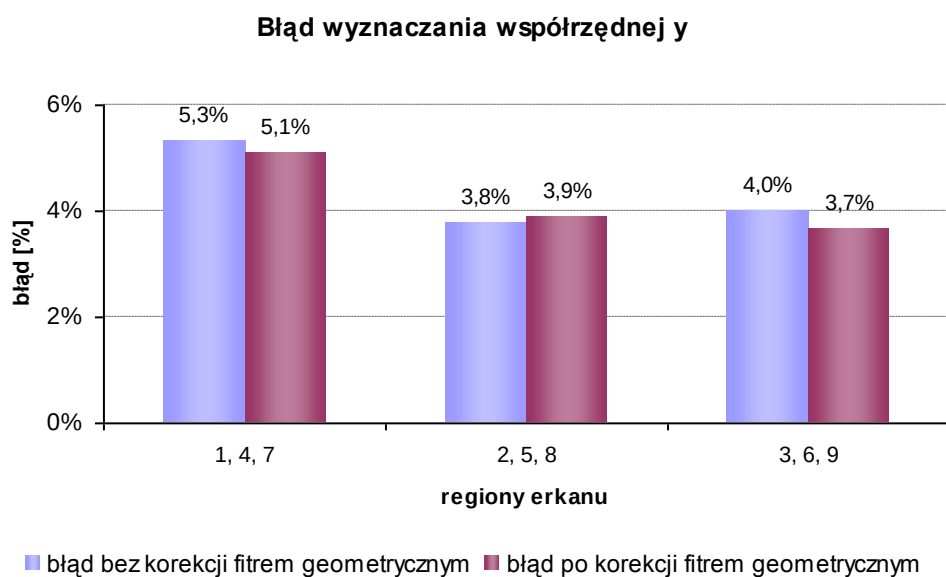
Rys. 6. 36 Podział ekranu na regiony

Poniższy wykres przedstawia błąd wyznaczania współrzędnej horyzontalnej ( $x$ ) dla każdego z poszczególnych obszarów.



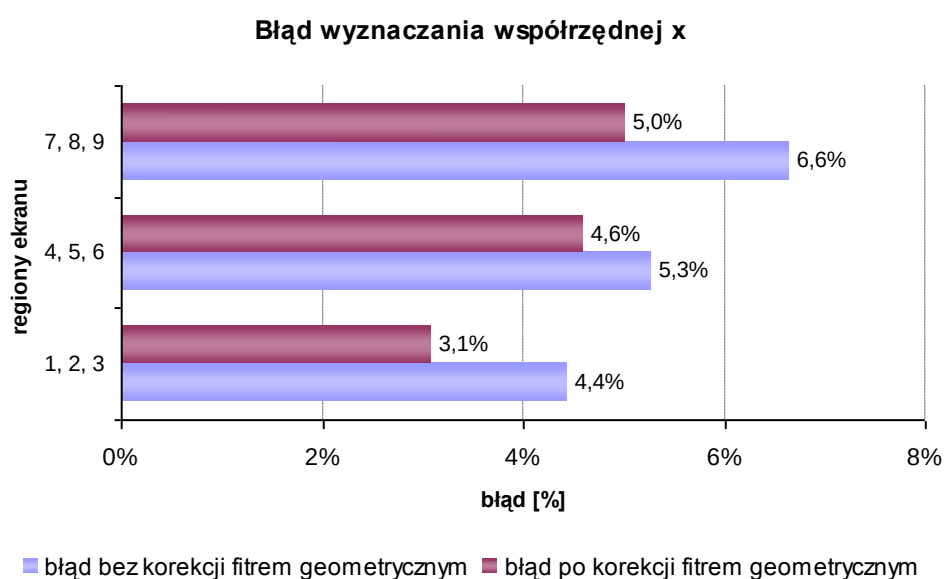
Wykres 6. 10 Błąd wyznaczania współrzędnej  $x$

Poniższy wykres przedstawia błąd wyznaczania współrzędnej wertykalnej ( $y$ ) dla każdego z poszczególnych obszarów.



**Wykres 6. 11 Błąd wyznaczania współrzędnej y**

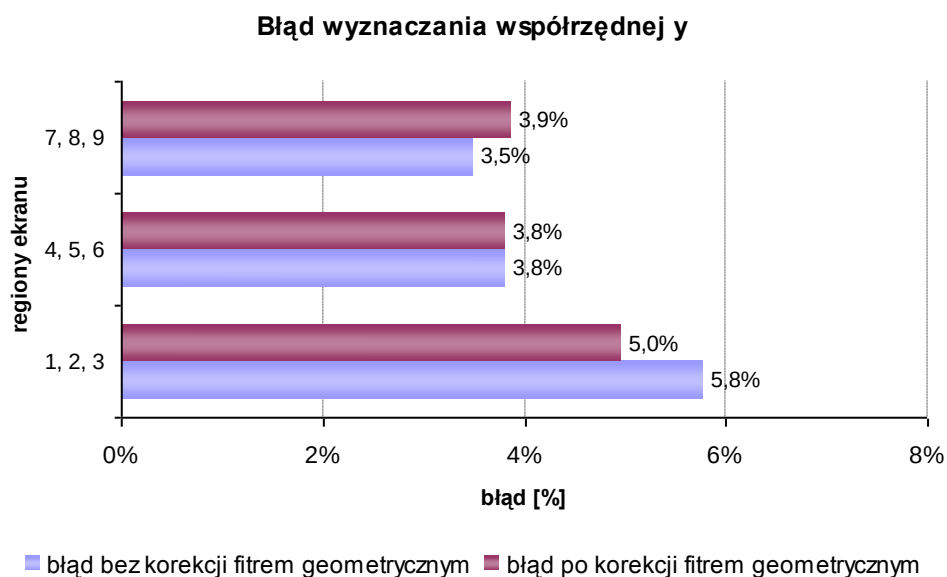
W drugim etapie badań, wyznaczono średnie błędy dla trzech obszarów utworzona jako suma regionów pokrywających się w poziomie. Pierwszy obszar stanowiły regiony 1, 2 i 3, drugi 4, 5 i 6, a trzeci odpowiednio 7, 8 oraz 9. Oznaczenie regionów ekranu jest zgodne z rysunkiem 6.36. Poniższy wykres przedstawia błąd wyznaczania współrzędnej horyzontalnej ( $x$ ) dla każdego z poszczególnych obszarów.



**Wykres 6. 12 Błąd wyznaczania współrzędnej x**

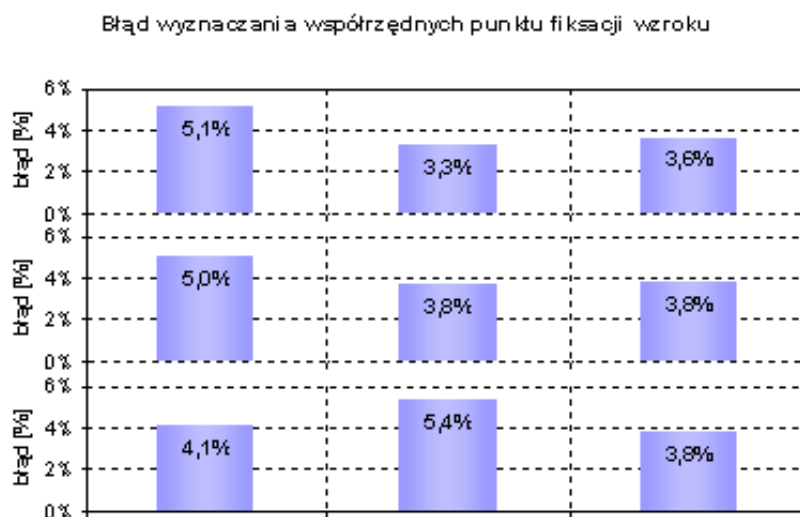


Poniższy wykres przedstawia błąd wyznaczania współrzędnej wertykalnej (y) dla każdego z poszczególnych obszarów.



**Wykres 6. 13 Błąd wyznaczania współrzędnej y**

W trzecim etapie badania określono średnie błędy całkowite dla każdego z dziewięciu regionów ekranu oznaczonych zgodnie z rysunkiem 6.36.



**Wykres 6. 14 Błąd wyznaczania współrzędnych dla każdego regionu ekranu**

## **Analiza wyników**

Na podstawie wyników powyższych badań zostało wysuniętych kilka istotnych wniosków:

- dla danego oka mniejszy błąd występuje, gdy oko skierowane jest w przeciwny obszar ekranu
- zaobserwowano znaczny wpływ filtru geometrycznego na poprawę skuteczności wyznaczania współrzędnej  $x$ , natomiast mniejszy wpływ dla współrzędnej  $y$
- błąd współrzędnej  $x$  jest tym mniejszy, im punkt fiksacji położony jest niżej
- dla współrzędnej  $y$  zależność jest odwrotna niż powyższa, im punkt fiksacji położony jest niżej, tym występuje większy błąd wyznaczania współrzędnej  $y$
- korekcja geometryczna ma najbardziej pozytywny wpływ dla współrzędnej  $x$  oraz najmniej pozytywny wpływ dla współrzędnej  $y$  dla środkowo-górnego obszaru ekranu (region 2)
- największy błąd przy analizie lewego oka występuje dla regionu 1 (lewy-górny)

Wyniki powyższych badania i wnioski z ich analizy zostały wykorzystane do poprawy algorytmów odpowiedzialnych za korekcję geometryczną oraz do ogólnej analizy funkcjonalności systemu.

### **6.3.2.9 Badania skuteczności systemu dla różnych wielkości monitorów**

#### **Opis badania**

Badanie to polegało na określeniu wyników działania systemu dla trzech wielkości monitorów:

- monitor o przekątnej 19 cali (zalecany do pracy z systemem)
- monitor o przekątnej 17 cali (kompatybilny z systemem)

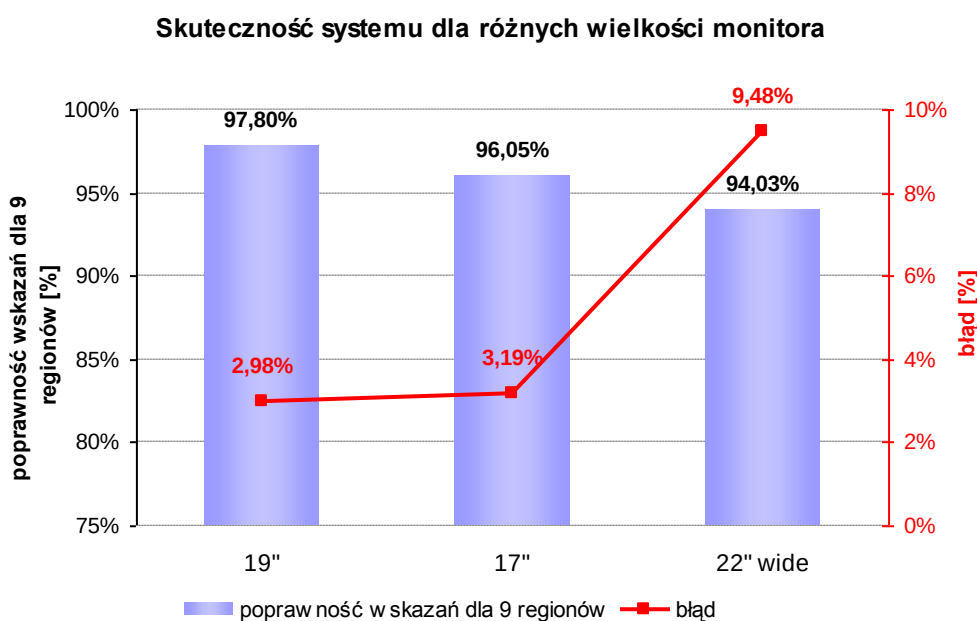
- monitor panoramiczny o przekątnej 22 cali (niezalecany do pracy z systemem)

### Warunki wykonywania pomiarów

Wszystkie badania zostały wykonane dla algorytmu aplikacji w pełnej postaci uwzględniając wszystkie etapy analizy danych. Dla monitora 17-calowego aplikacja została przełączona w tryb pracy z takim monitorem, natomiast dla monitora 22 calowego dokonano nieznacznej modyfikacji algorytmu tak, aby system był w stanie generować poprawne wyniki. Badania wykonano w warunkach optymalnych.

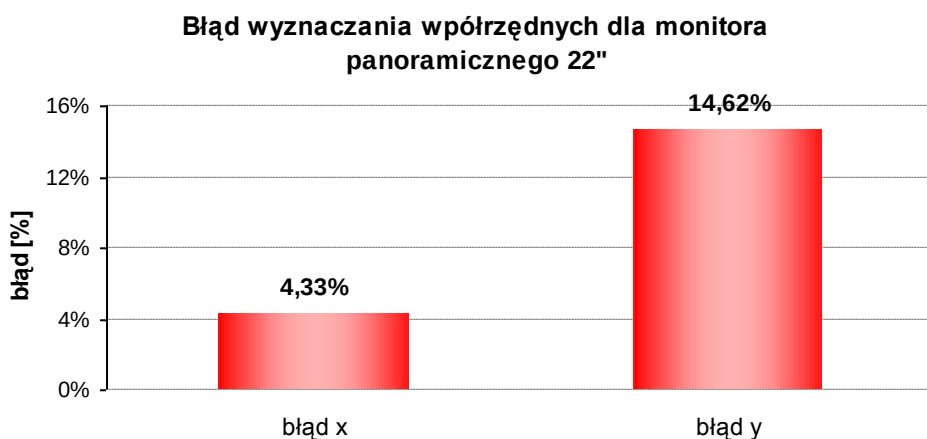
### Wyniki badań

Wyniki badań skuteczności i błędów dla poszczególnych monitorów zostały przedstawione na wykresie 6.15.



**Wykres 6. 15 Wielkość monitora a skuteczność systemu**

Dla monitora 22-calowego wykonano również badanie poziomu błędów dla współrzędnej x oraz y. Wyniki zostały zaprezentowane na wykresie 6.16.



**Wykres 6. 16 Błędy wyznaczania współrzędnych dla monitora 22-calowego**

### **Analiza wyników**

Opisane powyżej badania wskazują, że system poprawnie współpracuje z monitorami o przekątnych 17 i 19 cali. Przy współpracy z monitorem panoramicznym 22-calowym skuteczność pracy spadła, a błąd wskazywania punktu fiksacji wzroku wzrósł o 6 pp. Na podstawie analizy drugiego z prezentowanych wykresów stwierdzono, że błąd współrzędnej y jest znacząco większy niż błąd współrzędnej x. Spowodowane jest to stosunkiem rozmiarów boków ekranu, wynoszącym 16:9. Boki prawy i lewy są znacznie krótsze, przez co mniejszy błąd w jednostkach bezwzględnych jest określany jako stosunkowo większy w jednostkach względnych, których podstawą jest długość boku ekranu.

### **6.3.2.10 Badanie określania punktu fiksacji wzroku dla dziewięciu regionów ekranu**

#### **Opis badania**

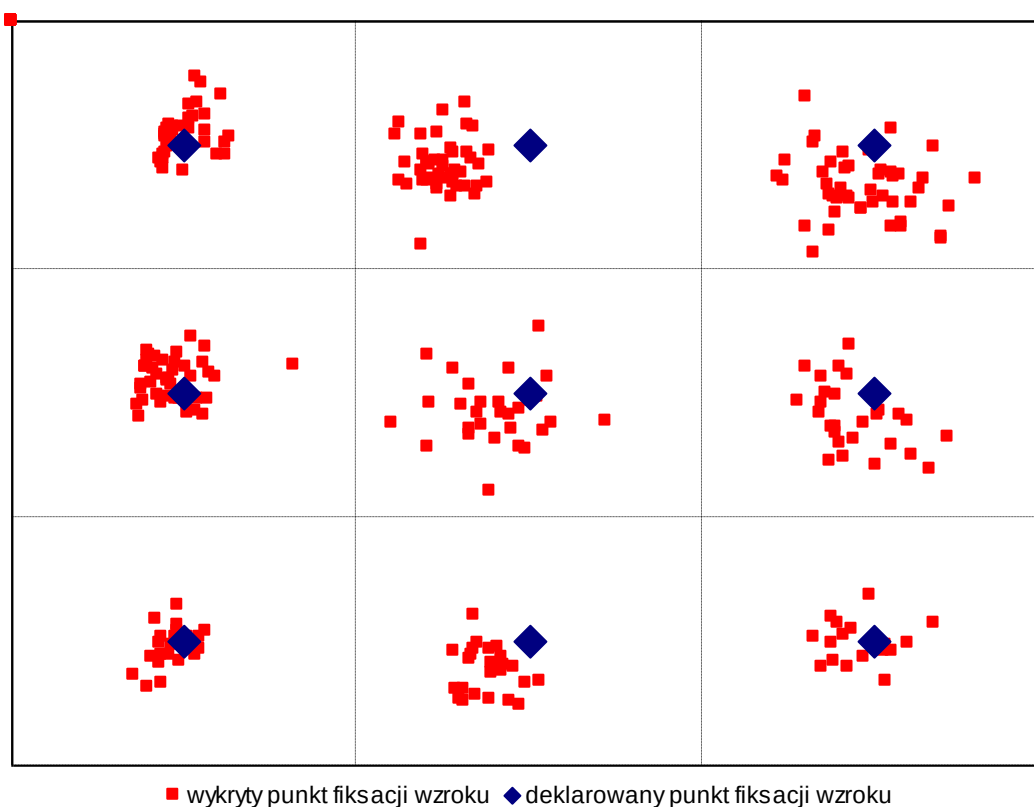
Badanie to polegało na wyznaczeniu i prezentacji na wykresie wyznaczonych punktów fiksacji wzroku na ekranie. Badanie zostało wykonane dla punktów fiksacji wzroku ustalanych w środkach 9 regionów ekranu.

## Warunki wykonywania pomiarów

Badanie zostało wykonane dla zbioru danych liczącego 600 próbek wykonanych w warunkach optymalnych dla systemu.

## Wyniki badań

Wykres 6.17 prezentuje wyniki detekcji punktu fiksacji wzroku w przestrzeni ekranu:



Wykres 6. 17 Deklarowane i wyznaczone współrzędne punktów fiksacji wzroku

## Analiza wyników

Na podstawie badania można określić jakościowo funkcjonalność systemu. Na zaprezentowanym wykresie zostały przedstawione deklarowane przez użytkownika i wykryte punkty fiksacji wzroku. Jakość działania systemu można określić jako bardzo dobrą, wszystkie punkty można przyporządkować do określonego regionu ekranu.

### **6.3.3 Podsumowanie**

W podrozdziale przedstawiono szereg testów i badań dotyczący zaprojektowanego systemu detekcji punktu fiksacji wzroku na ekranie monitora komputerowego. Dla każdej z prac badawczych zaprezentowano wyniki działania systemu, ich analizę i wpływ na implementację algorytmów w finalnej wersji aplikacji. Dzięki przeprowadzonym badaniom została wprowadzona znaczna ilość poprawek usprawniających funkcjonalność i skuteczność aplikacji.

## **7. Podsumowanie**

W ramach tego rozdziału dokonano podsumowania niniejszej pracy. Opisano wynik prac badawczych, przykładowe zastosowania zaprojektowanego systemu. Dokonano podsumowania pracy, a następnie opisano perspektywy rozwoju, które mogą służyć rozszerzeniu możliwości zaprojektowanej aplikacji.

### **7.1 Wyniki pracy**

W ramach prac badawczych został stworzony kompletny system detekcji punktu fiksacji wzroku. System jest niezależnym produktem, który przy zachowaniu zalecanych wymagań sprzętowych i środowiskowych może poprawnie funkcjonować niezależnie od zastosowanej platformy sprzętowej.

Wynikiem prac jest produkt niskobudżetowy, oparty o typową kamerę internetową korzystającą z interfejsu USB. Niezbędna do uruchomienia systemu warstwa sprzętowa również charakteryzuje się niskim zapotrzebowaniem na nakłady finansowe.

W podrozdziale 6.3 dokonano szczegółowych testów dotyczących opisywanego rozwiązania. Wyniki prac badawczych nad stworzoną aplikacją potwierdzają, że system charakteryzuje się wysoką dokładnością. Nie bez znaczenia dla poziomu funkcjonalności pozostają warunki zewnętrzne oraz sposób interakcji użytkownika z systemem, jednak pomimo warunków utrudniających pracę aplikacja może prowadzić poprawną pracę.

### **7.2 Praktyczne zastosowanie**

Eye-tracking jest obiektywnym narzędziem badawczym do badania postrzegania wzrokowego z wykorzystaniem rejestracji ruchów oczu oglądającego. Dostarcza precyzyjnych, obiektywnych danych liczbowych o tym, które fragmenty obrazu, w jakiej kolejności i jak długo są postrzegane. Pozwala to na bardzo szerokie zastosowanie systemu. Budowane są dość proste urządzenia wskazujące umożliwiające pracę na komputerze osobom z nabytymi dysfunkcjami organizmu lub po prostu zastępujące tradycyjną myszkę. Zastosowanie eye-trackingu w fazie projektu kampanii

marketingowej lub projektu internetowego pozwala uniknąć ryzyka popełnienia kosztownych błędów.

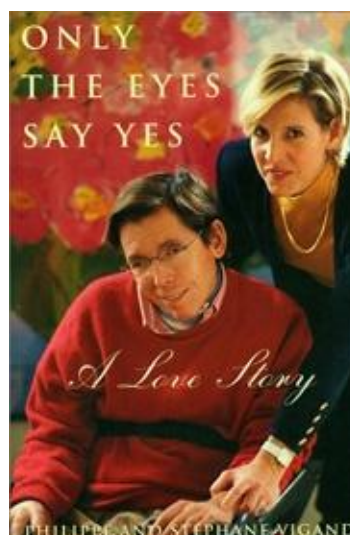
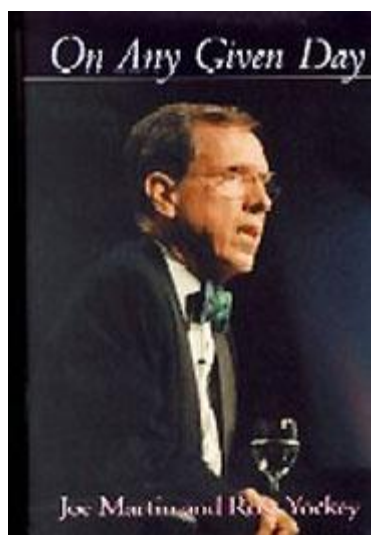
Istnieje wiele rozwiązań dla osób mogących wykonywać jedynie ruchy oczami. Kontrolę nad komputerem zapewnia kamera umieszczona w okolicach dolnej części monitora. Przykładowo komputer Iriscom potrafi przybliżać ruch myszki dzięki obserwacji oczu użytkownika. Kursor na ekranie podąża za wzrokiem użytkownika, a tradycyjnemu kliknięciu ikony odpowiada zamruganie. Komputer może być używany nawet przez osoby, które mrugają okresowo mimowolnie, gdyż aby "kliknąć" ikonę należy patrzeć w pewien ograniczony obszar ekranu. Dodatkowo komputer ma opcję wyświetlania na ekranie klawiatury, dzięki czemu użytkownik może pisać bez użycia tradycyjnej klawiatury [27].

Poprzez eye-tracker sprzężony z komputerem i odpowiednim oprogramowaniem wzrok pełni rolę urządzenia wejściowego podobnie jak myszka lub klawiatura. Po krótkim okresie ćwiczeń, pisanie wzrokiem za pomocą klawiatury wyświetlonej u dołu ekranu, staje się bardzo efektywnym sposobem pisania tekstów i sterowania komputerem. Taką technologię opracowała już przed laty amerykańska firma LC Technologies, a w Europie firma Tobii ze Szwecji.

Niestety opracowania te są nadal zbyt drogie, by mogły doczekać się powszechnego zastosowania. Badacze i inżynierowie z 10 krajów Europejskich połączyli siły w ramach konsorcjum i projektu pod nazwą COGAIN. Głównym ich celem jest opracowanie efektywnych i ekonomicznie dostępnych technologii opartych na eyetrackingu, przeznaczonych do wspomagania osób niepełnosprawnych. Jedną z dróg będzie opracowanie komputera osobistego, do którego poszczególne standaryzowane moduły związane z technologią eye-trackingową (kamery, interfejsy, oprogramowanie) będą mogły produkować różne firmy. Użytkownik końcowy zaś będzie mógł złożyć sobie odpowiednią dla siebie konfigurację sprzętowo-programową, bez konieczności zakupu całego wyposażenia od jednego producenta [25].

Dowodem słuszności a zarazem skuteczności tego typu systemów są min. książki ‘napisane jedynie wzrokiem’, liczne osiągnięcia we wspomaganiu leczenia pewnych dysfunkcji rozwojowych człowieka czy z innej strony zyski wynikające z poprawnie przeprowadzonej kampanii reklamowej.





Książki napisane dzięki systemowi śledzenia punktu fiksacji wzroku [24]

### 7.3 Podsumowanie pracy

Techniki detekcji punktu fiksacji wzroku rozwijają się w szybkim tempie od początków XX wieku. Poczynając od metod inwazyjnych człowiek próbował określić pracę gałki ocznej w coraz doskonalszy i dokładniejszy sposób. Kolejnym etapem rozwoju były techniki nieinwazyjne bazujące na obserwacji oka przez kamerę wizyjną. Uzupełnieniem tych technik było zastosowanie promieniowania podczerwonego do obserwacji pracy gałki ocznej. Taką technologię zastosowano również w ramach opisywanego w pracy urządzenia.

W części teoretycznej pracy dokonano przeglądu najważniejszych, dotychczas opracowanych technik detekcji punktu fiksacji wzroku. Przedstawiono również opis budowy i właściwości oka ludzkiego, który jest niezbędny do zrozumienia procesów zachodzących w czasie pracy oka.

Część praktyczna pracy zawiera opis zaprojektowanego i stworzonego systemu detekcji punktu fiksacji wzroku. Określono założenia i cel, który przyświecał pracom projektowym nad opisywanym systemem. W ramach tej części dokonano szczegółowego opisu badań dotyczących algorytmów zrealizowanych w środowisku Matlab. Drugi rozdział części praktycznej zawiera opis stworzonej aplikacji działającej w trybie rzeczywistym. Po kolei opisano wyniki prac nad częścią sprzętową i programową

systemu. Następnie przedstawiono założenia, sposób działania oraz wyniki prac badawczych przeprowadzonych na stworzonym systemie.

Detekcja punktu fiksacji wzroku jest złożonym zagadnieniem, realizacja techniczna systemów zajmujących się tym zagadnieniem wymaga prac badawczych na wielu płaszczyznach. Kolejne technologie zajmujące się tym zagadnieniem charakteryzują się coraz większą dokładnością, jednak perspektywy rozwojowe są bardzo szerokie.

## 7.4 Perspektywy rozwoju

Opisywane rozwiązanie ma szerokie perspektywy rozwoju, które mogą zapewnić większą skuteczność, dokładność i odporność na niekorzystne warunki. Jeszcze lepsze wyniki mogłyby być osiągnięte przy zwiększeniu odporności aplikacji na ruchy głową i ilość światła słonecznego znajdującego się w pomieszczeniu [14][15].

Inną ścieżką rozwoju technologii mogą być prace związane z zaprojektowaniem systemu działającego przy eliminacji konieczności przełączania ramek obrazu. Zapewniło by to znaczną poprawę funkcjonalności systemu. Prace te wiązałyby się z inną, bardziej złożoną technologią przetwarzania obrazu. Zwiększenie przenośności rozwiązania mogłoby również nastąpić poprzez eliminację wymogu instalacji diod na wszystkich czterech rogach ekranu.

Perspektywy rozwoju systemów zajmujących się zagadnieniem detekcji punktu fiksacji wzroku są bardzo szerokie. Wyraża się nadzieję, iż prace badawcze związane z tymi technologiami, rozwijające wyniki przedstawionych prac, będą podjęte w przyszłości.

Postępy prac można śledzić na łamach stron organizacji IEEE, w artykule *Comparison of gaze point estimation methods*, Gdańsk University of Technology, Multimedia Systems Department.

## 8. Bibliografia

- [1] A. Kiruluta, M. Eizenman, S. Pasupathy, *Predictive head movement tracking using a Kalman filter*, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B, 1997
- [2] A. Śluzek, „Zastosowanie metod momentowych do identyfikacji obiektów w cyfrowych systemach wizyjnych”, Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1990.
- [3] D.H. Yoo, M.J. Chung, D.B. Ju, I.H. Choi. *Non-intrusive Eye Gaze Estimation using a Projective Invariant under Head Movement*
- [4] D. H. Yoo and M. J. Chung. *Non-intrusive Eye Gaze Estimation without Knowledge of Eye Pose*
- [5] D. N. Kortchagine and A. S. Krylov, *Projection Filtering in Image Processing*, International Conference Graphicon 2000, Moscow, Russia.
- [6] J.Kim, K. Park, G. Khang. *A Method for Size Estimation of Amorphous Pupil in 3-Dimensional Geometry*
- [7] J. S. Babcock and J.B. Pelz. *Building a lightweight eye tracking headgear*
- [8] J. Wang, R. Venkateswarlu, E. Sung. *Eye Gaze Estimation from a Single Image of One Eye*
- [9] K. Nishino, P.N. Belhumeur, S.K. Nayar, *Using eye reflections for face recognition under varying illumination*, Tenth IEEE International Conference on Computer Vision, 2005. ICCV 2005.
- [10] M. H. Nizankowska. *Podstawy okulistyki*

- [11] R. M. Mimica and C.H. Morimoto. *A Computer Vision Framework for Eye Gaze Tracking*
- [12] S. Karpov, W. Chmielewska. *Irydologia w praktyce*
- [13] S. Rakshit, D. M. Monro. *Iris image selection and localization based on analysis of specular reflection*
- [14] Y. Ebisawa, Improved video-based eye-gaze detection method, IEEE Trans. Instrum. Meas. 47 (4) (1998) pp. 948-955.
- [15] Y. Matsumoto, A. Zelinsky, *Real-time face tracking system for human-robot interaction*, in: IEEE Internat. Conf. on System, Man, and Cybernetics, pp. 830-835, 112.
- [16] Z. Zhu and Q. Ji. *Eye gaze tracking under natural head movements*
- [17] POLSKA NORMA. *PN-EN 60825-1*

**Strony internetowe** (*stan z dnia 22.06.2008r.*)

- [18] <http://www.apple.com/quicktime/technologies/h264/>  
Strona firmy Apple.  
*Opis i właściwości kodeka H.264.*
- [19] <http://csep10.phys.utk.edu/astr162/lect/sun/spectrum.html>  
*Opis promieniowania słonecznego.*
- [20] [http://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_radiation](http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_radiation)  
Encyklopedia internetowa Wikipedia.  
*Opis promieniowania słonecznego.*

- [21] <http://en.wikipedia.org/wiki/H.264>  
Encyklopedia internetowa Wikipedia.  
*Opis i właściwości kodeka H.264.*
- [22] [http://en.wikipedia.org/wiki/Universal\\_Serial\\_Bus](http://en.wikipedia.org/wiki/Universal_Serial_Bus)  
Encyklopedia internetowa Wikipedia.  
*Opis i właściwości interfejsu USB.*
- [23] [http://en.wikipedia.org/wiki/Adaptive\\_thresholding](http://en.wikipedia.org/wiki/Adaptive_thresholding)  
Encyklopedia internetowa Wikipedia.  
*Przetwarzanie obrazu przez progowanie adaptacyjne.*
- [24] <http://www.eyegaze.com>  
*Eye-tracking solutions*
- [25] <http://www.eyetracking.pl>  
*Nowe technologie eye-trackinogowe*
- [26] <http://www.hcibib.org/>  
Zasoby Human-Computer Interaction.  
*Opis interfejsów Human-Computer Interaction*
- [27] <http://www.iriscom.org/webant/index.html>  
*Eye Tracking Communication*
- [28] <http://www.kameda-lab.org/research/publication/1995/kameda-ACCV95/html/node6.html>  
*Zastosowanie technik obrazu różnicowego.*
- [29] [http://www.logitech.com/index.cfm/webcam\\_communications/webcams/  
/devices/3056&&cl=us,en](http://www.logitech.com/index.cfm/webcam_communications/webcams/devices/3056&&cl=us,en)  
Strona firmy Logitech.  
*Informacje o kamerze Logitech 9000 PRO.*

- [30] <http://msdn.microsoft.com/en-us/vstudio/default.aspx>  
Visual Studio Developer Center.  
*Wsparcie dla środowiska Visual Studio..*
- [31] <http://www.nowywzrok.pl/>  
*Proces widzenia.*
- [32] <http://www.portalwiedzy.onet.pl>.  
*Gąłka oczna, mięśnie.*
- [33] <http://www.swiatlo.tak.pl>.  
*Proces widzenia.*
- [34] <http://www.signalprocessingsociety.org/publications/periodicals/image-processing/>  
Strona Signal Processing Society.  
*Informacje o technikach przetwarzania sygnałów.*
- [35] <http://sourceforge.net/projects/opencvlibrary/>  
Strona projektu Intel OpenCV.  
*Wsparcie dla biblioteki Intel OpenCV.*
- [36] <http://tech-led.com/index.shtml>  
Strona firmy Marubeni – producenta diod LED.
- [37] <http://www.technologia-wody.pl/>  
Strona dotyczą technologii uzdatniania wody.  
*Informacje o oknie optycznym oka ludzkiego.*

## 9. Dodatki

- Katalog ‘obrazy wynikowe’ – zestaw obrazów JPEG zawierające kolejne etapy prac algorytmu przetwarzania obrazu.
- Plik ‘eyepoints31.xls’ – arkusz programu Microsoft Excel zawierający wyniki i analizę pomiarów wykonanych w ramach badań nad systemem.
- Katalog ‘eyetracker’ - projekt aplikacji w środowisku Microsoft Visual Studio C++.
- Katalog ‘biblioteki’ – zestaw bibliotek niezbędny do uruchomienia i prowadzenia prac rozwojowych nad aplikacją systemu.
- Katalog ‘matlab’ – zawierający projekt aplikacji w środowisku Matlab, oraz bazę wynikową, zinterpretowaną w arkuszu kalkulacyjnym