



**Politechnika
Śląska**

PROJEKT INŻYNIERSKI

System wizyjny do śledzenia ruchu gałek ocznych

Bartosz WUWER

Nr albumu: 296949

Kierunek: Automatyka i Robotyka

Specjalność: Technologie informacyjne w automatyce i robotyce

PROWADZĄCY PRACĘ

Dr inż. Krzysztof Jaskot

KATEDRA Automatyki i Robotyki

Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki

Gliwice 2025

Tytuł pracy

System wizyjny do śledzenia ruchu gałek ocznych

Streszczenie

(Streszczenie pracy – odpowiednie pole w systemie APD powinno zawierać kopię tego streszczenia.)

Słowa kluczowe

(2-5 słów (fraz) kluczowych, oddzielonych przecinkami)

Thesis title

Vision system for tracking the movement of the eyeballs

Abstract

(Thesis abstract – to be copied into an appropriate field during an electronic submission – in English.)

Key words

(2-5 keywords, separated by commas)

Spis treści

1	Wstęp	1
1.1	Wprowadzenie i osadzenie w dziedzinie	1
1.2	Cel oraz zakres pracy	2
2	[Analiza tematu]	3
3	Wymagania i narzędzia	7
4	[Właściwy dla kierunku – np. Specyfikacja zewnętrzna]	9
5	[Właściwy dla kierunku – np. Specyfikacja wewnętrzna]	11
6	Weryfikacja i walidacja	13
7	Podsumowanie i wnioski	15
	Bibliografia	17
	Spis skrótów i symboli	21
	Źródła	23
	Lista dodatkowych plików, uzupełniających tekst pracy	25
	Spis rysunków	27
	Spis tabel	29

Rozdział 1

Wstęp

1.1 Wprowadzenie i osadzenie w dziedzinie

Śledzenie ruchu gałek ocznych (ang. eye-tracking), zwane również jako okulografia, jest techniką która badana jest od ponad stu lat. Istotność tej techniki wynika z faktu, że ruchy gałek ocznych są ściśle związane z procesami poznawczymi, takimi jak uwaga, percepcja, pamięć, czy procesy decyzyjne. Skupiając wzrok na danym punkcie, umieszczamy go w centralnym obszarze naszego pola widzenia które charakteryzuje się największą rozdzielczością, co pozwala na dokładne analizowanie szczegółów. Ten fakt wpływa także na proces skupienia – gdy koncentrujemy się na danym obiekcie lub obszarze skupiamy na nim wzrok (często wystarczy jedynie krótki moment).

Możliwość rejestrowania ruchów oczu pozwala na zrozumienie w jaki sposób obserwator eksploruje otaczający go świat. Posiadając tą wiedzę możliwe jest wyciągnięcie wniosków na temat tego co jest interesujące lub istotne dla obserwatora, jakie emocje się z tym wiążą, czy nawet jakie procesy poznawcze zachodzą w jego umyśle, czy rozumie on to co widzi. Nie trudnym jest zauważyć jak cenne mogą być te informacje w szerokim spektrum dziedzin.

Okulografia odgrywa kluczową rolę w psychologii poznawczej, psychologii społecznej, neurobiologii, marketingu, czy medycynie. W psychologii poznawczej ruch oczu jest ściśle związany z pamięcią, podejmowaniem decyzji, obciążeniem poznawczym i uczeniem się asocjacyjnym. W psychologii społecznej eye-tracking pozwala na wgląd w zachowania społeczne i ich analizę, co pozwala badać empatię, prospołeczność, czy fobie społeczne [9]. W neurobiologii bada się powiązania ruchu oczu ze szlakami neuronowymi odpowiedzialnymi za podejmowane akcje i procesy myślowe, dając możliwość w diagnozach i wsparciu osób dotkniętych chorobą Parkinsona [3], Alzheimerem [2], a także autyzmem czy łagodnym upośledzeniem funkcji poznawczych [8]. W medycynie okulografia pozwala na diagnozę między innymi oczopląsu, który może być objawem np. stwardnienia rozsianego, uszkodzenia śródmózgowia lub urazu ucha wewnętrznego [1]. Niezaprzeczalnie technika ta jest

niezwykle cenna i efektywna na wielu płaszczyznach naukowych i praktycznych.

1.2 Cel oraz zakres pracy

Celem niniejszej pracy jest stworzenie narzędzia które pozwoli na uniwersalne śledzenie ruchu gałek ocznych, bez zdefiniowanej docelowej grupy użytkowników. System ten powinien być prosty w obsłudze i niewymagający zaawansowanej technologii, ale nie ograniczający w razie potrzeby bardziej zaawansowanych użytkowników, prezentując użyteczność zarówno dla naukowców, studentów, jak i hobbystów. Tego typu narzędzie pozwoli na eksplorację danych eye-trackingowych, otwierając możliwości na dalszą analizę i interpretację wyników, a także zapewni solidną podstawę w razie potrzeby modyfikacji lub rozbudowy systemu w bardziej ukierunkowany sposób.

Praca ta skupia się przede wszystkim na samym procesie wykrywania źrenic i śledzenia ruchu gałek ocznych na ich podstawie oraz implementacji systemu wizyjnego, który pozwoli na zapis, wizualizację i potencjalną dalszą analizę danych zebranych przez kamerę, w tym także kamerę internetową. Całość zrealizowana jest w języku Python, z wykorzystaniem bibliotek takich jak OpenCV, NumPy, Pandas oraz Matplotlib, a wszelkie prezentowane dane zostały uchwycone przy użyciu wbudowanej kamery laptopa. Praca nie będzie obejmować rozległej analizy zebranych danych, ani eksperymentów przeprowadzonych z użyciem owego systemu. Nie została także stworzona grupa testowa, więc większość testów przeprowadzone zostały na autorze pracy.

- wprowadzenie w problem/zagadnienie
- osadzenie problemu w dziedzinie
- cel pracy
- zakres pracy
- zwięzła charakterystyka rozdziałów
- jednoznaczne określenie wkładu autora, w przypadku prac wieloosobowych – tabela z autorstwem poszczególnych elementów pracy

Rozdział 2

[Analiza tematu]

Szczegółowe sformułowanie problemu Śledzenie ruchu gałek ocznych (ang. eye-tracking) to proces rejestrowania i analizy sposobu, w jaki ludzkie oczy poruszają się w trakcie obserwacji otoczenia lub analizowania określonych bodźców wizualnych. Problem ten jest istotny, ponieważ ludzki wzrok jest kluczowym narzędziem percepcji, a sposób, w jaki poruszamy oczami, dostarcza bezpośrednich informacji o mechanizmach uwagi, percepcji i procesów decyzyjnych. Oczy rejestrują jedynie niewielki obszar otoczenia w wysokiej rozdzielczości (tzw. plamka żółta), co wymaga ciągłego ruchu w celu skupienia wzroku na interesujących obszarach.

Główne pytania badawcze dotyczą:

Identyfikacji mechanizmów leżących u podstaw ruchów oczu, takich jak sakady, fiksacje czy dryfy; Analizy trajektorii ruchów w celu interpretacji procesów poznawczych, takich jak uwaga selektywna czy eksploracja wizualna; Opracowania efektywnych metod analizy i wizualizacji dużych zbiorów danych generowanych podczas badań eye-trackingowych. Współczesny rozwój technologii eye-trackingu umożliwił precyzyjną rejestrację trajektorii ruchów gałek ocznych, jednak nadal istnieją wyzwania związane z interpretacją wyników, skalowalnością analiz oraz adaptacją narzędzi do różnych dziedzin badawczych i aplikacji.

Osadzenie tematu w kontekście aktualnego stanu wiedzy (state of the art) Eye-tracking to technologia zyskująca na popularności dzięki postępowi w precyzji urządzeń rejestrujących oraz spadkowi ich kosztów. Obecny stan wiedzy obejmuje zarówno aspekty techniczne, jak i teoretyczne związane z analizą danych eye-trackingowych.

Technologie i urządzenia eye-trackingowe: Najnowocześniejsze urządzenia korzystają z technologii optycznych i wideo, takich jak systemy montowane na głowie (np. okulary rejestrujące ruchy oczu) oraz stacjonarne urządzenia rejestrujące pozycję oka w czasie rzeczywistym. Firmy takie jak Tobii, EyeLink czy Pupil Labs dominują na rynku, oferując rozwiązania różniące się precyzją, mobilnością i kosztem.

Zastosowania eye-trackingu: W psychologii i neurobiologii eye-tracking wykorzystywany jest do badania procesów uwagi, percepcji oraz podejmowania decyzji. W marketingu umożliwia analizę wzorców oglądania reklam, a w interfejsach człowiek-komputer

pozwała na projektowanie bardziej intuicyjnych systemów. W medycynie stosuje się go m.in. do diagnostyki chorób neurologicznych, takich jak autyzm czy choroba Parkinsona.

Ograniczenia technologiczne i wyzwania: Pomimo rozwoju technologii, istnieją trudności w interpretacji wyników badań. Brak uniwersalnych standardów analizy, a także różnorodność dostępnych algorytmów detekcji fiksacji i sakad, sprawiają, że analiza ruchów oczu wymaga znacznego doświadczenia i dostosowywania parametrów.

Studia literaturowe – opis znanych rozwiązań Badania naukowe i literatura fachowa dostarczają licznych przykładów metod i algorytmów stosowanych w analizie danych eye-trackingowych. Poniżej przedstawiono najważniejsze rozwiązania opisane w literaturze.

Algorytmy analizy trajektorii ruchów oczu:

Algorytmy detekcji fiksacji: Velocity-Threshold Identification (I-VT) – metoda oparta na progach prędkości ruchu gałki ocznej, używana do identyfikacji okresów stabilnego spojrzenia (fiksacji) oraz szybkich ruchów (sakad). Dispersion-Threshold Identification (I-DT) – bazuje na obliczaniu dyspersji (rozproszenia) punktów spojrzenia w określonym przedziale czasowym. Algorytmy segmentacji trajektorii: Hidden Markov Models (HMM) – modele statystyczne używane do identyfikacji sekwencji ruchów oczu w danych złożonych. Clustering-Based Methods – wykorzystujące algorytmy grupowania, takie jak k-średnie, w celu klasyfikacji punktów spojrzenia. Przykłady narzędzi i oprogramowania:

Tobii Pro Lab – komercyjne oprogramowanie pozwalające na analizę i wizualizację danych eye-trackingowych, szeroko stosowane w badaniach naukowych i marketingowych. PsychoPy i PyGaze – otwarte platformy do projektowania eksperymentów i analizy danych. OpenGaze – inicjatywa open-source rozwijająca algorytmy analizy i wizualizacji danych eye-trackingowych. Porównanie podejść: Badania naukowe, takie jak [Duchowski, 2017], podkreślają, że wybór metody analizy zależy od charakteru danych i celów badawczych. Metody proste, takie jak I-VT, są skuteczne w analizie podstawowych wzorców, natomiast bardziej zaawansowane podejścia, jak HMM, oferują większą elastyczność, ale kosztem złożoności obliczeniowej.

Podsumowanie: Studia literaturowe wskazują, że rozwój algorytmów i narzędzi analizy danych eye-trackingowych jest kluczowy dla efektywnego wykorzystania tej technologii w badaniach naukowych i praktycznych zastosowaniach. Jednak wciąż istnieją wyzwania związane z interpretacją wyników, integracją danych z różnych źródeł oraz tworzeniem intuicyjnych narzędzi do analizy.

Widzeniem fovealnym nazywamy wspomniany już wcześniej fakt, że widzimy w największej rozdzielczości jedynie centrum pola widzenia. Wynika to z budowy siatkówki, która posiada dołek środkowy (fovea centralis), jest to niewielki obszar, który charakteryzuje się największym zagęszczeniem czopków. Taka budowa siatkówki, która odpowiada za odbiór bodźców wzrokowych, sprawia, że nieustannie poruszamy oczami. Skupiając wzrok na danym punkcie, musimy być gotowi na to, że cała reszta pola widzenia straci dla nas na ostrości, jest to proces, który przypomina filtrację wielu otaczających nas informacji,

do paru, które mają w tym momencie znaczenie.

Uwaga wzrokowa może zostać opisana przez idiomy "gdzie" i "co", które pozwalają na zobrazowanie jej selektywnej natury. "Gdzie" to proces wizualnego wyszukiwania i wyboru lokalizacji, które zwróciło naszą uwagę, w celu dokładniejszego zbadania. Istotnym aspektem tego procesu selekcji jest widzenie peryferyjne, czyli te oddalone od naszego punktu skupienia, ale wciąż pozwalające na wyodrębnienie kształtów i ruchu, co w pewien sposób prowadzi nasze centralne spojrzenie. Przykładem może być spojrzenie przez okno, w pierwszym momencie nasz wzrok kierowany jest na wyraźne kształty, światła czy nagły ruch taki jak np. lądujący ptak. "Co" można nazwać odwrotnością "gdzie", jest to proces szczegółowego badania danego obszaru, charakteryzują go takie zjawiska jak fiksacja, czyli stabilizacja wzroku na danym punkcie oraz ruchy sakkadowe, czyli szybkie ruchy oczu pomiędzy kolejnymi punktami, które pozwalają na obserwacje. Całość tworzy kanał percepcyjny o ograniczonym zasięgu przestrzennym, obejmujący interesujący obszar, budując w ten sposób naszą świadomość i zrozumienie celu naszego spojrzenia. Wracając do poprzedniego przykładu, po zauważeniu ptaka, nasze spojrzenie skupi się na nim, a ruchy oczu pozwolą na dokładne zbadanie jego kształtu, koloru i detali. To właśnie połączenie "gdzie" i "co" pozwala na głębsze zrozumienie otaczającego nas świata. To właśnie te ścieżki skanowania dają nam wgląd w badaną osobę, a pomiar widzenia fovealnego w czasie odzwierciedla chwilowe i jawne skupienie uwagi wzrokowej obserwatora.

Tutaj warto wspomnieć o poszukiwaniu wzrokowym, jest to proces aktywnego przeszukiwania pola widzenia w celu znalezienia konkretnego celu, a częścią tego procesu jest etap przeduwagowy. Etap ten równolegle analizuje duży obszar widzenia jednocześnie, dzieje się to automatycznie, nieświadomie i nie wymaga widzenia fovealnego. Co charakteryzuje ten proces to umiejętność rozpoznania czterech podstawowych cech: kolor, rozmiar, orientacja oraz obecność i/lub kierunek ruchu. Etap przeduwagowy jest pierwszym krokiem poszukiwania wzrokowego i obejmuje dużą część poszukiwania typu równoległego i relatywnie niewielką część poszukiwania typu sekwencyjnego. Ruch gałek ocznych i związane z nim widzenie jest bardzo szerokim tematem interdyscyplinarnym, na potrzeby tego projektu powyższe sformułowanie problemu, chociaż uproszczone i nie wyczerpujące, pozwala na zrozumienie w pełni istoty prezentowanego systemu.

- sformułowanie problemu
- osadzenie tematu w kontekście aktualnego stanu wiedzy (*state of the art*) o poruszonym problemie
- studia literaturowe [6, 7, 5, 4] - opis znanych rozwiązań (także opisanych naukowo, jeżeli problem jest poruszany w publikacjach naukowych), algorytmów,

Wzory

$$y = \frac{\partial x}{\partial t} \tag{2.1}$$

jak i pojedyncze symbole x i y składa się w trybie matematycznym.

Rozdział 3

Wymagania i narzędzia

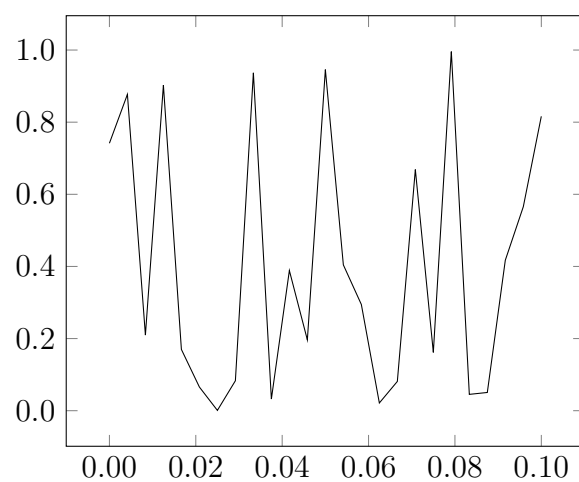
- wymagania funkcjonalne i нефункционалне
- przypadki użycia (diagramy UML) – dla prac, w których mają zastosowanie
- opis narzędzi, metod eksperymentalnych, metod modelowania itp.
- metodyka pracy nad projektowaniem i implementacją – dla prac, w których ma to zastosowanie

Rozdział 4

[Właściwy dla kierunku – np. Specyfikacja zewnętrzna]

Jeśli „Specyfikacja zewnętrzna”:

- wymagania sprzętowe i programowe
- sposób instalacji
- sposób aktywacji
- kategorie użytkowników
- sposób obsługi
- administracja systemem
- kwestie bezpieczeństwa
- przykład działania
- scenariusze korzystania z systemu (ilustrowane zrzutami z ekranu lub generowanymi dokumentami)



Rysunek 4.1: Podpis rysunku po rysunkiem.

Rozdział 5

[Właściwy dla kierunku – np. Specyfikacja wewnętrzna]

Jeśli „Specyfikacja wewnętrzna”:

- przedstawienie idei
- architektura systemu
- opis struktur danych (i organizacji baz danych)
- komponenty, moduły, biblioteki, przegląd ważniejszych klas (jeśli występują)
- przegląd ważniejszych algorytmów (jeśli występują)
- szczegóły implementacji wybranych fragmentów, zastosowane wzorce projektowe
- diagramy UML

Krótką wstawka kodu w linii tekstu jest możliwa, np. **int a;** (biblioteka `listings`). Dłuższe fragmenty lepiej jest umieszczać jako rysunek, np. kod na rys 5.1, a naprawdę długie fragmenty – w załączniku.

```
1 class test : public basic
2 {
3     public:
4         test (int a);
5         friend std::ostream operator<<(std::ostream & s,
6                                         const test & t);
7     protected:
8         int _a;
9
10 };
```

Rysunek 5.1: Pseudokod w `listings`.

Rozdział 6

Weryfikacja i walidacja

- sposób testowania w ramach pracy (np. odniesienie do modelu V)
- organizacja eksperymentów
- przypadki testowe zakres testowania (pełny/niepełny)
- wykryte i usunięte błędy
- opcjonalnie wyniki badań eksperymentalnych

Tabela 6.1: Nagłówek tabeli jest nad tabelą.

ζ	metoda						
	alg. 1	alg. 2	alg. 3			alg. 4, $\gamma = 2$	
			$\alpha = 1.5$	$\alpha = 2$	$\alpha = 3$	$\beta = 0.1$	$\beta = -0.1$
0	8.3250	1.45305	7.5791	14.8517	20.0028	1.16396	1.1365
5	0.6111	2.27126	6.9952	13.8560	18.6064	1.18659	1.1630
10	11.6126	2.69218	6.2520	12.5202	16.8278	1.23180	1.2045
15	0.5665	2.95046	5.7753	11.4588	15.4837	1.25131	1.2614
20	15.8728	3.07225	5.3071	10.3935	13.8738	1.25307	1.2217
25	0.9791	3.19034	5.4575	9.9533	13.0721	1.27104	1.2640
30	2.0228	3.27474	5.7461	9.7164	12.2637	1.33404	1.3209
35	13.4210	3.36086	6.6735	10.0442	12.0270	1.35385	1.3059
40	13.2226	3.36420	7.7248	10.4495	12.0379	1.34919	1.2768
45	12.8445	3.47436	8.5539	10.8552	12.2773	1.42303	1.4362
50	12.9245	3.58228	9.2702	11.2183	12.3990	1.40922	1.3724

Rozdział 7

Podsumowanie i wnioski

- uzyskane wyniki w świetle postawionych celów i zdefiniowanych wyżej wymagań
- kierunki ewentualnych danych prac (rozbudowa funkcjonalna ...)
- problemy napotkane w trakcie pracy

Bibliografia

- [1] Redakcja Diagnostyki. *Oczopląs - co może oznaczać? Jakie badania warto wykonać?* 2023. URL: <https://diag.pl/pacjent/artykuly/oczoplas-co-moze-oznaczac-jakie-badania-warto-wykonac/#2-0-czym-swiadczy-oczoplas> (term. wiz. 10.01.2025).
- [2] Ieva Miseviciute. *4 methods to assess Alzheimer's with eye tracking*. 2025. URL: <https://www.tobii.com/resource-center/learn-articles/4-methods-to-assess-alzheimers-with-eye-tracking> (term. wiz. 09.01.2025).
- [3] Ieva Miseviciute. *How does Parkinson's disease alter visual search?* 2025. URL: <https://www.tobii.com/resource-center/scientific-publications/how-does-parkinsons-disease-alter-visual-search> (term. wiz. 09.01.2025).
- [4] Imię Nazwisko i Imię Nazwisko. *Tytuł strony internetowej*. 2021. URL: <http://gdzies/w/internecie/internet.html> (term. wiz. 30.09.2021).
- [5] Imię Nazwisko, Imię Nazwisko i Imię Nazwisko. „Tytuł artykułu konferencyjnego”. W: *Nazwa konferencji*. 2006, s. 5346–5349.
- [6] Imię Nazwisko, Imię Nazwisko i Imię Nazwisko. „Tytuł artykułu w czasopiśmie”. W: *Tytuł czasopisma* 157.8 (2016), s. 1092–1113.
- [7] Imię Nazwisko, Imię Nazwisko i Imię Nazwisko. *Tytuł książki*. Warszawa: Wydawnictwo, 2017. ISBN: 83-204-3229-9-434.
- [8] Tobii. *Eye tracking in neurology and psychiatry research*. 2025. URL: <https://www.tobii.com/resource-center/reports-and-papers/eye-tracking-neurology-and-psychiatry-research> (term. wiz. 09.01.2025).
- [9] Tobii. *Psychology and neuroscience use cases*. 2025. URL: <https://www.tobii.com/products/eye-trackers/screen-based/psychology-neuroscience-use-cases> (term. wiz. 09.01.2025).

Dodatki

Spis skrótów i symboli

DNA kwas deoksyrybonukleinowy (ang. *deoxyribonucleic acid*)

MVC model – widok – kontroler (ang. *model-view-controller*)

N liczebność zbioru danych

μ stopnień przyleżności do zbioru

\mathbb{E} zbiór krawędzi grafu

\mathcal{L} transformata Laplace’a

Źródła

Jeżeli w pracy konieczne jest umieszczenie długich fragmentów kodu źródłowego, należy je przenieść w to miejsce.

```
1 if (_nClusters < 1)
2     throw std::string ("unknown_number_of_clusters");
3 if (_nIterations < 1 and _epsilon < 0)
4     throw std::string ("You_should_set_a_maximal_number_of_
        iteration_or_minimal_difference_epsilon.");
5 if (_nIterations > 0 and _epsilon > 0)
6     throw std::string ("Both_number_of_iterations_and_minimal_
        epsilon_set—you_should_set_either_number_of_iterations_
        or_minimal_epsilon.");
```

Lista dodatkowych plików, uzupełniających tekst pracy

W systemie do pracy dołączono dodatkowe pliki zawierające:

- źródła programu,
- dane testowe,
- film pokazujący działanie opracowanego oprogramowania lub zaprojektowanego i wykonanego urządzenia,
- itp.

Spis rysunków

4.1	Podpis rysunku po rysunkiem.	10
5.1	Pseudokod w <code>listings</code>	12

Spis tabel

6.1	Nagłówek tabeli jest nad tabelą.	14
-----	--	----