



**Politechnika
Śląska**

PRACA MAGISTERSKA

Środowisko symulacyjne interakcji społecznych na potrzeby wspomagania
diagnostyki zaburzeń ze spektrum autyzmu

Michał POKRZYWA

Nr albumu: 295732

Kierunek: Informatyka

Specjalność: Interaktywna Grafika Trójwymiarowa

PROWADZĄCY PRACĘ

Dr inż. Damian Pęszor

KATEDRA Grafiki, Wizji Komputerowej i Systemów Cyfrowych

Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki

Gliwice 2025

Tytuł pracy

Środowisko symulacyjne interakcji społecznych na potrzeby wspomagania diagnostyki zaburzeń ze spektrum autyzmu

Streszczenie

Interakcja socjalna jest skutecznym sposobem na rozpoznawanie objawów zaburzeń ze spektrum autyzmu. Subiektywna ocena wpływa jednak istotnie na porównywalność pozytywnych wyników pomiędzy różnymi pacjentami i różnymi pracownikami medycznymi. Nowoczesne technologie umożliwiają wykorzystanie silników gier do stworzenia symulacji, która pozwalałaby na uzyskanie stałych i kontrolowanych warunków interakcji społecznych, dzięki czemu możliwą staje się obiektywna ocena wyników przeprowadzonych badań. W toku projektu planuje się utworzenie środowiska wspierającego diagnostykę poprzez odwzorowanie w nim interakcji społecznych w sposób symulowany. W ramach pracy zaprojektowano i zaimplementowano prototyp takiego środowiska oraz przeprowadzono badanie pilotażowe, które potwierdziło techniczną wykonalność rozwiązania i wskazało na obiecujący potencjał diagnostyczny wybranych metryk okulograficznych i akustycznych.

Słowa kluczowe

(Spektrum autyzmu, Interakcja społeczna, Środowisko symulacyjne, Diagnostyka)

Thesis title

A social interaction simulation environment to support the diagnosis of autism spectrum disorder

Abstract

Social interaction is an effective method for identifying symptoms of autism spectrum disorders. However, subjective evaluation significantly affects the comparability of results obtained from different patients and medical professionals. Modern technologies enable the use of game engines to create simulations that provide consistent and controlled conditions for social interactions. This allows for an objective assessment of the conducted research outcomes. The project aims to develop an environment that supports diagnostics by simulating social interactions within a virtual setting. As part of the thesis, a prototype of such an environment was designed and implemented, and a pilot study was carried out, confirming the technical feasibility of the solution and indicating a promising diagnostic potential of selected eye-tracking and acoustic metrics.

Key words

(Autism Spectrum Disorder, Social interaction, Simulation environment, Diagnostics)

Spis treści

1 Wstęp	1
1.1 Wprowadzenie	1
1.2 Cel pracy	2
1.3 Zakres pracy	2
1.4 Charakterystyka rozdziałów	2
2 Analiza Tematu	5
2.1 Zaburzenie ze spektrum autyzmu	5
2.1.1 Definicje i kryteria diagnostyczne	5
2.1.2 Heterogeniczność spektrum i fenotypowe różnice	5
2.1.3 Funkcjonowanie społeczne	6
2.2 Tradycyjne metody diagnostyczne i ocena zachowań społecznych	7
2.2.1 Narzędzia kliniczne	7
2.2.2 Ograniczenia metod Klinicznych	8
2.3 Behawioralne wskaźniki interakcji społecznych	8
2.3.1 Uwaga społeczna i kontakt wzrokowy	8
2.3.2 Mowa i pragmatyka	9
2.3.3 Mimika, gesty i synchronia ruchu ciała	9
2.3.4 Złożone sekwencje interakcyjne i ich kodowanie	10
2.4 Technologie pomiarowe	10
2.4.1 Śledzenie wzroku	10
2.4.2 Systemy rejestracji ruchu i analiza gestów	11
2.4.3 Analiza mowy i przetwarzanie sygnału audio	11
2.4.4 Czujniki fizjologiczne	11
2.4.5 Integracja multisensoryczna	12
2.5 Analiza danych i metody	12
2.5.1 Przetwarzanie surowych danych i proces analityczny	12
2.5.2 Przykładowe metryki i reprezentacje cech	13
2.5.3 Metody statystyczne i analizy porównawcze	19
2.5.4 Przegląd istniejących rozwiązań	19
2.6 Przegląd literatury	22

2.6.1	Projektowanie scenariuszy diagnostycznych	22
2.6.2	Współprojektowanie scenariuszy	22
2.6.3	Wirtualna rzeczywistość	23
2.6.4	Książki z rozszerzoną rzeczywistością	23
2.6.5	Aplikacje komputerowe	24
2.6.6	Gry poważne	24
2.6.7	Dynamiczne śledzenie wzroku	24
3	Przedmiot pracy	25
3.1	Scenariusz badania	25
3.1.1	Cel zadania	25
3.1.2	Punkty kontrolne zadania	25
3.1.3	Ukończenie zadania	26
3.2	Zastosowane narzędzia	26
3.2.1	Środowisko deweloperskie	26
3.2.2	Biblioteki i integracje sprzętowe	26
3.2.3	Programy zewnętrzne	26
3.3	Wykorzystane metryki	27
3.3.1	Ocena ryzyka ASD	28
3.4	Działanie programu	30
3.4.1	Widok badanego	30
3.4.2	Ekran kalibracji badanego	30
3.4.3	Widok prowadzącego	32
3.4.4	Logowanie i formaty danych	33
4	Badania	35
4.1	Metodyka badań	35
4.1.1	Cel badania	35
4.1.2	Scenariusz badania	35
4.1.3	Protokół badania	36
4.1.4	Opis stanowiska badawczego	36
4.1.5	Opis oprogramowania	37
4.2	Zbiory danych	37
4.3	Wyniki	38
4.3.1	Wskaźnik uwagi społecznej	38
4.3.2	Fiksacje	39
4.3.3	Częstość mrugnięć	40
4.3.4	Średnia applituda sakkad	41
4.3.5	Częstotliwość podstawowa	42
4.3.6	Drganie	43

4.3.7	Migotanie	44
4.3.8	Stosunek harmoniczny do szumu	45
4.3.9	Ocena ryzyka ASD	46
4.3.10	Korelacja między metrykami	47
4.4	Podsumowanie wyników	50
5	Podsumowanie	51
Bibliografia		53
Bibliografia		58
Spis skrótów i symboli		61
Lista dodatkowych plików, uzupełniających tekst pracy		63
Spis rysunków		65

Rozdział 1

Wstęp

1.1 Wprowadzenie

Zaburzenia ze spektrum autyzmu (ang. *Autism Spectrum Disorder*, ASD) to złożone zaburzenia neurorozwojowe. Podstawowe objawy ASD to trudności w obszarze komunikacji i interakcji społecznych oraz występowanie ograniczonych, powtarzalnych wzorców zachowań, zainteresowań lub aktywności. Termin *spektrum* odzwierciedla znaczną heterogeniczność - objawy i ich nasilenie mogą znacznie różnić się między osobami, co utrudnia ujednolicone podejście diagnostyczne. W kontekście diagnostyki jedną z najbardziej informatywnych domen są obserwacje zachowań społecznych: wzajemność społeczno-emocjonalna, komunikacja niewerbalna, takie jak mimika, gesty, kontakt wzrokowy oraz umiejętność nawiązywania i podtrzymywania relacji. Wczesne i trafne rozpoznanie deficytów w tych obszarach jest kluczowe, ponieważ umożliwia wdrożenie interwencji o udokumentowanym wpływie na funkcjonowanie i jakość życia osób z ASD.

Mimo postępów w diagnostyce, standardowe procedury - oparte na wywiadach klinicznych, obserwacji behawioralnej i kwestionariuszach opiekunów - mają istotne ograniczenia. Przede wszystkim niosą ze sobą element subiektywności i zależność od doświadczenia oraz interpretacji specjalisty. Dodatkowo maskowanie trudności społecznych, w szczególności u osób wysoko funkcjonujących, oraz duża zmienność fenotypowa zwiększa ryzyko nietrafnych lub opóźnionych diagnoz. Tradycyjne oceny bywają też czasochłonne i wymagające dużych nakładów zasobów, co ogranicza dostępność badań przesiewowych i powtarzalnych ewaluacji.

W odpowiedzi na te wyzwania rośnie zainteresowanie technologiami dostarczającymi obiektywnych, ilościowych miar zachowania. Środowiska symulacyjne takie jak aplikacje okienkowe, wirtualnej rzeczywistości (ang. *Virtual Reality*, VR), rozszerzonej rzeczywistości (ang. *Augmented Reality*, AR) wraz z technikami rejestracji, takimi jak śledzenie wzroku (ang. *eye-tracking*), rejestracja ruchu ciała i analiza akustyczna mowy, pozwalają na kontrolowane odtworzenie sytuacji społecznych, powtarzalność scenariuszy oraz zbie-

ranie precyzyjnych danych czasowo-przestrzennych. W połączeniu z metodami analizy sygnałów i uczenia maszynowego, takie narzędzia mogą uzupełniać tradycyjne procedury diagnostyczne, oferując standaryzowane, porównywalne wskaźniki, jak na przykład czas patrzenia na twarz rozmówcy, sekwencje trajektorii wzroku czy latencję reakcji, które wspomagają ocenę trudności społecznych.

1.2 Cel pracy

Celem niniejszej pracy jest zaprojektowanie, zaimplementowanie oraz przeprowadzenie wstępnej ewaluacji prototypowego środowiska symulacyjnego do badania interakcji społecznych, które będzie wspomagać diagnostykę zaburzeń ze spektrum autyzmu (ASD) poprzez dostarczanie obiektywnych, ilościowych miar zachowań społecznych. Praca ma na celu stworzenie narzędzia pozwalającego na powtarzalne i kontrolowane odtwarzanie sytuacji społecznych oraz na rejestrację danych, tak aby możliwe było porównywanie zachowań między uczestnikami, testowanie hipotez dotyczących mechanizmów trudności społecznych i wstępne sprawdzenie wartości diagnostycznej wybranych metryk. Istotnym elementem jest także weryfikacja hipotezy, że dane pozyskane w środowisku symulacyjnym mogą dostarczać bardziej precyzyjnych i obiektywnych wskaźników zachowań społecznych w celu lepszego wykrywania spektrum autyzmu, co w dłuższej perspektywie może zwiększyć trafność i czułość diagnostyczną narzędzi stosowanych w praktyce klinicznej.

1.3 Zakres pracy

Zakres pracy obejmuje opracowanie projektu koncepcyjnego i jego implementację prototypową w wersji komputerowej lub VR, przygotowanie kilku zróżnicowanych scenariuszy interakcji społecznych, integrację rejestracji behawioralnej, na przykład śledzenie wzroku oraz przeprowadzenie badania pilotażowego mającego na celu ocenę, które mierzące wskaźniki zachowań uzyskane w symulacji korelują ze standardowymi narzędziami diagnostycznymi i pozwalają różnicować osoby z ASD od osób typowo rozwijających się. Poza zakresem tej pracy pozostaje pełna walidacja kliniczna na dużej próbie, rozwój komercyjnego produktu oraz tworzenie zaawansowanych programów terapeutycznych.

1.4 Charakterystyka rozdziałów

- **Rozdział 1** Wstęp – przedstawienie problemu, cele i zakres pracy.
- **Rozdział 2** Analiza Tematu – omówienie aktualnego stanu wiedzy o ASD, stosowanych metod diagnostycznych, badań nad zachowaniem społecznym oraz przegląd technologii symulacyjnych i technik rejestracji.

- **Rozdział 3** Przedmiot pracy – opis protokołu badawczego: projekt scenariuszy, procedury eksperymentalne, metody ekstrakcji cech i analizy danych. Rozdział zawiera również opis techniczny systemu: architektura oprogramowania, opis scenariuszy, sposób integracji urządzeń pomiarowych, formaty i przykładowe próbki danych.
- **Rozdział 4** Badania – przedstawienie przeprowadzonych prób, wyników, analizy i interpretacja wyników oraz implikacje praktyczne i badawcze.
- **Rozdział 5** Podsumowanie – synteza najważniejszych ustaleń, wnioski końcowe, możliwości dotyczące dalszego rozwoju i walidacji systemu.

Rozdział 2

Analiza Tematu

2.1 Zaburzenie ze spektrum autyzmu

2.1.1 Definicje i kryteria diagnostyczne

Zaburzenia ze spektrum autyzmu (ASD) definiuje się jako neurorozwojowe zaburzenia charakteryzujące się deficytami w zakresie komunikacji i interakcji społecznych oraz występowaniem ograniczonych, powtarzalnych wzorców zachowań, zainteresowań lub aktywności [38]. W psychologii najpopularniejszymi stosowanymi kryteriami diagnostycznymi są Podręcznik diagnostyczny i statystyczny zaburzeń psychicznych, wydanie piąte (ang. *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders, Fifth Edition*, DSM-5)[2] oraz Międzynarodowa Klasyfikacja Chorób, jedenasta rewizja (ang. *International Classification of Diseases 11th Revision*, ICD-11) [45]. W kryterium diagnostycznym ICD-11 ASD jest określane jako:

- Trwałe deficyty w nawiązywaniu i utrzymywaniu komunikacji społecznej oraz wzajemnych interakcji społecznych.
- Trwałe, ograniczone, powtarzalne i nieelastyczne wzorce zachowań, zainteresowań lub czynności

Dodatkowo kryteria DSM-5 oraz ICD-11 podkreślają obecność objawów od wczesnego okresu rozwoju oraz ich wpływ na codzienne funkcjonowanie.

2.1.2 Heterogeniczność spektrum i fenotypowe różnice

Zaburzenia ze spektrum autyzmu cechuje wysoka heterogeniczność - zarówno pod względem nasilenia objawów, jak i ich jakości, na przykład różne profile językowe, sensoryczne, motoryczne czy poznawcze. Różnorodność ta sprawia, że pojedyncza metryka behawioralna może być czuła w określonej podgrupie osób z ASD, a jednocześnie nieprzydatna w innej, dlatego podkreśla się zatem potrzebę jawnego określania populacji badanej

- wieku, poziomu funkcjonowania i współwystępujących zaburzeń oraz stosowania analiz stratyfikacyjnych i moderujących, które ujawniają, dla kogo i w jakich warunkach dana miara ma wartość diagnostyczną [44]. Empiryczne badania ilustrują praktyczne skutki tej heterogeniczności. Przykładowo, prace z śledzeniem wzroku pokazują, że wynik czasu patrzenia na twarz zależy silnie od typu bodźca, czy jest to statyczny obraz, czy dynamiczna, społecznie angażująca scena, a także od wieku i profilu sensorycznego uczestnika. [16, 25, 12]. W badaniach wykorzystujących środowiska symulacyjne i VR odnotowano z kolei dużą zmienność reakcji - niektóre osoby lepiej reagują w kontrolowanym, immersyjnym kontekście, inne zaś wykazują większy dyskomfort lub odmienny wzorzec zaangażowania, co ma konsekwencje dla projektowania scenariuszy i doboru metryk [35, 24, 34, 36].

2.1.3 Funkcjonowanie społeczne

W literaturze wyróżnia się trzy komplementarne kierunki teoretyczne, które najczęściej wykorzystuje się do wyjaśniania trudności w funkcjonowaniu społecznym u osób z ASD:

- Teoria umysłu (ang. *Theory of Mind*, ToM),
- Hipoteza motywacji społecznej (ang. *Social Motivation*),
- Problem podwójnej empatii (ang. *Double Empathy Problem*).

Teoria umysłu

Teoria umysłu (ang. *Theory of Mind*, ToM) odnosi się do zdolności przypisywania innym ludziom stanów mentalnych - przekonań, intencji i pragnień - co pozwala przewidywać i interpretować ich działania. Klasyczne badania wskazują, że u wielu osób z ASD występują trudności w zadaniach ToM [4]. W kolejnych dekadach rozwinięto metodykę badań ToM, wprowadzając między innymi test „Odczytanie myśli w oczach” (ang. *Reading the Mind in the Eyes*), który polega na pokazywaniu zdjęć przedstawiających jedynie oczy i okolice oczu, przy czym do każdego zdjęcia dołączone są zwykle cztery określenia opisujące stany umysłu lub uczucia. Zadaniem osoby badanej jest wybrać to słowo, które jej zdaniem najlepiej oddaje myśl, intencję lub emocję widoczną w oczach. Wynik uzyskuje się, sumując poprawne odpowiedzi, gdzie wyższy wynik interpretuje się jako lepsza umiejętność rozpoznawania stanów mentalnych innych ludzi. Takie badanie pozwala na rozumienie intencji w bardziej naturalistycznych warunkach [41]. Jednocześnie coraz częściej zwraca się uwagę, że wyniki uzyskane w zadaniach laboratoryjnych nie zawsze przekładają się bezpośrednio na zachowania w naturalnych sytuacjach społecznych, co podkreślają przeglądy i badania łączące ToM z pomiarami behawioralnymi [44, 26].

Hipoteza motywacji społecznej

Hipoteza motywacji społecznej zakłada, że część trudności społecznych w ASD wynika z osłabionej wrodzonej preferencji do przetwarzania bodźców społecznych, co prowadzi do mniejszego zaangażowania w interakcje społeczne [15]. Empiryczne badania potwierdzają, że metryki uwagi społecznej - takie jak procent czasu patrzenia na twarz czy liczba fiksacji - często różnią grupy badane, zwłaszcza gdy stosuje się dynamiczne, naturalistyczne bodźce [16, 25]. Co więcej, prace długookresowe wskazują, że wzorce orientacji wzrokowej we wczesnym niemowlęctwie mogą mieć prognostyczne znaczenie dla późniejszego rozwoju społeczno-komunikacyjnego [31], a badania wykorzystujące immersywne środowiska, takie jak wirtualna rzeczywistość albo rozszerzona rzeczywistość, dowodzą, że takie pomiary można przeprowadzać także w kontrolowanych, bardziej realistycznych kontekstach [35, 36].

Problem podwójnej empatii

Problem podwójnej empatii jest to teoria psychologiczna, która zakłada, że trudności w porozumieniu między osobami autystycznymi a neurotypowymi wynikają z wzajemnego niezrozumienia i różnic komunikacyjnych, zamiast jedynie z jednostronnych deficytów po stronie osób z ASD [43]. Z tej perspektywy zachowania uznawane za niekonwencjonalne mogą reprezentować odmienne strategie komunikacyjne, które stają się problematyczne głównie w kontakcie z partnerami o odmiennych oczekiwaniach, co potwierdzają obserwacje z badań VR i eksperymentów współtworzących, pokazujące wpływ adaptacji zachowania partnera na jakość wymiany [26, 34, 40]. Ponadto teoretyczne ujęcia percepacji oparte na modelach bayesowskich sugerują, że różnice w priorytetach przetwarzania sensorycznego i predykcji mogą dodatkowo wyjaśniać odmienne style percepcyjne i komunikacyjne obserwowane w ASD [46].

2.2 Tradycyjne metody diagnostyczne i ocena zachowań społecznych

2.2.1 Narzędzia kliniczne

Współczesna diagnostyka autyzmu w dużym stopniu opiera się na standaryzowanych narzędziach klinicznych, wśród których najważniejsze miejsce zajmują Skala obserwacyjna do diagnozy autyzmu - druga edycja (ang. *Autism Diagnostic Observation Schedule, Second Edition*, ADOS-2) oraz Wywiad diagnostyczny dotyczący autyzmu - wersja poprawiona (ang. *Autism Diagnostic Interview - Revised, ADI-R*). ADOS-2, będący obserwacyjną metodą oceny interakcji społecznych, komunikacji i powtarzalnych wzorców zachowań, uznawany jest za *złoty standard* w diagnozie, ponieważ umożliwia systema-

tyczną analizę reakcji jednostki w kontekście kontrolowanych sytuacji społecznych [39]. ADI-R natomiast koncentruje się na wywiadzie rozwojowym przeprowadzanym z rodzicem lub opiekunem, obejmującym historię komunikacji, zachowań społecznych i wzorców powtarzalnych [49]. Oprócz tych dwóch narzędzi stosuje się również różnorodne kwestionariusze przesiewowe i ocenające, takie jak skala reaktywności społecznej (*Social Responsiveness Scale*, SRS) czy kwestionariusz spektrum autyzmu (*Autism Spectrum Quotient*, AQ), które wspierają proces identyfikacji osób wymagających dalszej diagnozy [17].

2.2.2 Ograniczenia metod Klinicznych

Pomimo swojej wysokiej wartości klinicznej narzędzia takie jak ADOS-2 i ADI-R nie są wolne od ograniczeń. Ich stosowanie wiąże się z ryzykiem subiektywności oceny, wynikającym zarówno z doświadczenia diagnosty, jak i z kontekstu, w jakim odbywa się obserwacja [42]. Zmienność między ocenującymi może prowadzić do różnic w interpretacji zachowań, szczególnie w przypadku osób wysoko funkcjonujących, które często stosują strategie maskowania i kompensacji społecznej. Badania wykazały, że maskowanie tego rodzaju prowadzi do opóźnionego lub błędного rozpoznania, zwłaszcza u dziewcząt i kobiet w spektrum [30]. W konsekwencji, tradycyjne narzędzia mogą być niewystarczające do uchwycenia subtelnego przejawów autyzmu i nie zawsze oddają rzeczywiste doświadczenie osób badanych [38, 16]. Kolejnym ograniczeniem są wysokie wymagania w zakresie zasobów. Przykładowo narzędzie kliniczne ADI-R wymaga zapotrzebowania czasowego, gdzie badanie może trwać kilka godzin, oraz zapotrzebowania kadrowego, ponieważ wymagają wysoko wykwalifikowanego personelu. W wielu systemach ochrony zdrowia skutkuje to ograniczoną dostępnością diagnozy, co przekłada się na długie listy oczekujących i późny moment rozpoznania [62]. Ponadto procedury diagnostyczne bywają stresujące dla dzieci i rodzin, a ich przebieg zależy od współpracy opiekunów, co również może wpływać na jakość i wiarygodność zebranych danych. W literaturze coraz częściej podkreśla się konieczność uzupełniania metod klinicznych o obiektywne wskaźniki ilościowe, takie jak pomiary śledzenia wzroku czy analiza wzorców mowy i ruchu, które mogą zmniejszać subiektywność i zwiększać rzetelność diagnozy [25, 12]. Integracja metod tradycyjnych i technologicznych jest postrzegana jako obiecujący kierunek w stronę bardziej kompleksowego i dostępnego systemu diagnostycznego[35].

2.3 Behawioralne wskaźniki interakcji społecznych

2.3.1 Uwaga społeczna i kontakt wzrokowy

Jednym z najczęściej badanych wskaźników funkcjonowania społecznego w autyzmie jest uwaga społeczna, mierzona poprzez kontakt wzrokowy oraz preferencję kierowania

spojrzeń. Śledzenie wzroku umożliwia precyzyjny pomiar takich parametrów jak czas patrzenia na twarz i oczy, liczba oraz długość fiksacji czy sekwencje spojrzeń w dynamicznych scenach społecznych. Badania wskazują, że dzieci i dorośli w spektrum autyzmu wykazują odmienny rozkład uwagi między elementami społecznymi i niespołecznymi w porównaniu do grup neurotypowych [16, 25]. Co istotne, typ użytego bodźca, jak statyczny obraz twarzy czy dynamiczna scena interakcji, znacząco wpływa na uzyskiwane wyniki, ponieważ kontekst społeczny modyfikuje strategie eksploracji wzrokowej [33]. Dzięki swojej obiektywności i ilościowej naturze, wskaźniki okulograficzne stanowią cenne uzupełnienie tradycyjnych metod diagnostycznych, choć same w sobie nie oddają całego kontekstu interakcji.

2.3.2 Mowa i pragmatyka

Kolejnym ważnym źródłem informacji o funkcjonowaniu społecznym jest analiza akustyczna mowy, obejmująca tempo wypowiedzi, długość pauz, intonację i wzorce prozodyczne. Zaburzenia prozodii są jedną z częściej opisywanych cech w ASD, przy czym mogą przybierać różne formy: monotonna intonacja, nietypowe akcentowanie lub zaburzenia rytmu [50]. Analiza takich parametrów umożliwia identyfikację subtelnych różnic w komunikacji, które są trudne do uchwycenia w obserwacji klinicznej. Badania wskazują, że tempo i płynność wypowiedzi mogą być wskaźnikami zarówno stylu komunikacyjnego, jak i poziomu dostrojenia do rozmówcy [11]. W połączeniu z metrykami okulograficznymi czy analizą ruchu ciała dane akustyczne pozwalają uzyskać bardziej pełny obraz pragmatycznego funkcjonowania społecznego.

2.3.3 Mimika, gesty i synchronia ruchu ciała

Mimika i gestykulacja są kluczowe dla spójności i płynności interakcji społecznych. Analiza tych wskaźników za pomocą systemów przechwytywania ruchu (ang. *motion capture*) czy kamer głębi pozwala na ilościowe opisanie częstotliwości gestów, ich amplitudy, tempa oraz synchronii względem partnera interakcji. Synchronia ruchowa, rozumiana jako czasowe i jakościowe dopasowanie zachowań międzyosobowych, jest traktowana jako wskaźnik relacyjnego dostrojenia i zdolności do współdziałania [20]. W ASD obserwuje się nie tylko mniejszą spontaniczność gestów, ale także obniżony poziom ich dopasowania do dynamiki rozmowy [55]. Badania wskazują również, że analiza multimodalna, jak na przykład ruchu twarzy i rąk wraz z parametrami wokalnymi, dostarcza bogatszych danych o jakości interakcji niż pojedyncze wskaźniki [48].

2.3.4 Złożone sekwencje interakcyjne i ich kodowanie

Interakcje społeczne mają charakter sekwencyjny, a ich przebieg można opisać w kategoriach inicjacji, odpowiedzi, kontynuacji i zakończenia. Analiza takich sekwencji umożliwia identyfikację wzorców zakłóceń w przebiegu dialogu, na przykład nietypowej długości latencji odpowiedzi, braku adekwatnej reakcji lub problemów z naprzemiennością [56]. Zastosowanie metod kodowania konwersacyjnego pozwala na systematyczne uchwycenie trudności w płynności i koordynacji społecznej. W badaniach wykorzystuje się zarówno metody ręcznego kodowania, na przykład analiza nagrań wideo, jak i automatyczne systemy oparte na sztucznej inteligencji, które klasyfikują stany konwersacyjne na podstawie cech akustycznych i behawioralnych [10]. Kluczowe jest tu precyzyjne odwzorowanie czasowe, aby uchwycić dynamikę interakcji, a także stosowanie standaryzowanych protokołów, co umożliwia porównywanie wyników pomiędzy różnymi studiami.

2.4 Technologie pomiarowe

2.4.1 Śledzenie wzroku

Śledzenie wzroku (ang. *Eye-tracking*) występuje w wersji stacjonarnej (ang. *screen-based*) oraz noszonej (ang. *wearable*) i pozwala mierzyć fiksacje, sakkady, ścieżki spojrzeń oraz udział czasu patrzenia na obiekty społeczne [12]. Badania łączące śledzenie wzroku z pupilometrią pokazują przydatność takiego połączenia do oceny zaangażowania i reakcji emocjonalnych w kontekście społecznym [25]. Istotne jest przy tym, że typ zastosowanego bodźca znaczco modyfikuje uzyskiwane wyniki, co wykazały prace dotyczące uwagi społecznej [16]. W literaturze podkreśla się też praktyczne aspekty techniczne mające wpływ na jakość danych: dokładność i stabilność kalibracji, odporność systemu na ruchy głowy oraz odpowiednie zaprojektowanie zadań eksperymentalnych [12, 35].

Badania nad wykorzystaniem śledzenia wzroku wskazują, że osoby z ASD często poświęcają mniej uwagi twarzom i oczom, a więcej elementom niespołecznym sceny, choć wzorzec ten jest silnie zależny od rodzaju bodźca i kontekstu eksperymentalnego [33, 16]. W literaturze pojawiają się również prace testujące śledzenie wzroku jako potencjalny biomarker diagnostyczny, szczególnie w kontekście wcześniego wykrywania objawów u niemowląt i małych dzieci, a ostatnio systemy metryk śledzenia wzroku wykazują obiecujące wskaźniki czułości i specyficzności [60, 31]. Warto dodać, że pilotażowe badania i prace demonstracyjne również potwierdzają użyteczność śledzenia wzroku w badaniach populacji szkolnej i w warunkach edukacyjnych [27].

2.4.2 Systemy rejestracji ruchu i analiza gestów

Technologie rejestracji ruchu obejmują proste kamery głębi (np. Kinect), kamery 2D/3D, oraz rozbudowane systemy przechwytywania ruchu (ang. *motion capture*, *mocap*). Każda klasa urządzeń różni się pod względem kosztu, precyzji i wymagań względem środowiska pomiarowego [20]. Kamery głębi oferują relatywnie tani i prosty sposób rejestracji trajektorii ciała i gestów, jednak ich precyzja jest ograniczona w porównaniu z systemami mocap, które z kolei wymagają skomplikowanego ustawienia sprzętu i wyższych nakładów finansowych. Analiza ruchu pozwala wydobywać metryki synchronii i dynamiki, takie jak prędkości, akceleracje i korelacje czasowe między uczestnikami, które są istotne przy badaniu interakcji społecznych i poziomu dopasowania między partnerami [48, 20]. W kontekście ASD badania wykazują zmiany w zakresie spontaniczności gestów i ich dopasowania do partnera konwersacyjnego [55].

2.4.3 Analiza mowy i przetwarzanie sygnału audio

Analiza akustyczna mowy wykorzystuje narzędzia takie jak Praat [9] lub OpenSMILE [23, 3] do ekstrakcji cech prosodycznych i akustycznych, na przykład częstotliwość, intensywność, tempo czy długość pauz, które służą do oceny pragmatyki i jakości odpowiedzi dialogowych [11]. W badaniach ASD odnotowano różne cechy prosodyczne, takie jak monotonna intonacja czy nietypowe akcentowanie, które mogą być dyskretne i trudne do wychwycenia w obserwacji klinicznej, lecz wykrywalne przy użyciu automatycznych metod analizy sygnału [50]. W praktyce istotne jest uwzględnienie zmienności wynikającej z wieku, płci i poziomu językowego oraz zastosowanie procedur redukcji szumów i dokładnej segmentacji mowy przed ekstrakcją cech.

2.4.4 Czujniki fizjologiczne

Dane fizjologiczne uzupełniają informacje behawioralne o poziomie zaangażowania i reakcji autonomicznych; pupilometria, mierząca zmiany średnicy źrenicy, bywa traktowana jako wskaźnik uwagi i reakcji emocjonalnej w zadaniach społecznych [25]. Elektrodermalna aktywność skóry (ang. *Electrodermal activity*, EDA) oraz rytm serca (*Heart Rate*, HR) dostarczają informacji o aktywacji autonomicznego układu nerwowego, co może pomagać rozróżnić reakcje stresowe od wzrostu zaangażowania poznawczego podczas interakcji [20]. Ze względu na wrażliwość tych sygnałów na warunki eksperymentalne, takie jak temperatura czy ruch, wymagają one starannego zbierania i przetwarzania oraz odpowiednich procedur kalibracji.

2.4.5 Integracja multisensoryczna

Integracja wielu źródeł danych umożliwia wielowymiarowe odwzorowanie interakcji społecznej i zwiększa prawdopodobieństwo wykrycia subtelnych wzorców diagnostycznych, które mogłyby umknąć przy analizie pojedynczego sygnału [20, 10]. Jednocześnie podejście multisensoryczne podnosi złożoność synchronizacji pomiarów, wymaga dopracowanego przetwarzania danych, a także większych rozmiarów próby, żeby uniknąć przeuczenia w modelach uczenia maszynowego. W literaturze zwraca się uwagę, że choć integracja daje większy potencjał diagnostyczny, to wymaga też spójnych standardów raportowania i validacji, aby wyniki były porównywalne między badaniami i przydatne klinicznie [20, 10]. Dodatkowo należy uwzględnić aspekty etyczne i praktyczne, takie jak komfort uczestnika czy bezpieczeństwo danych, szczególnie gdy zbiera się szczegółowe nagrania video, audio i dane biometryczne.

2.5 Analiza danych i metody

2.5.1 Przetwarzanie surowych danych i proces analityczny

Analiza zaczyna się już w momencie rejestracji sygnału, dlatego warto zaplanować cały proces analityczny jeszcze na etapie projektowania eksperymentu. Najpierw opisywane są parametry akwizycji: rodzaj i częstotliwość próbkowania urządzeń (śledzenie wzroku, kamery ruchu, mikrofon, czujniki fizjologiczne), konfigurację sprzętową i sposób umieszczania znaczników zdarzeń (ang. *event markers*) w scenariuszu. Kolejnym krokiem jest synchronizacja wszystkich źródeł, gdzie można zastosować użycie wspólnego zegara lub jednoznacznych znaczników zdarzeń, co ułatwia późniejsze łączenie ścieżek czasowych i eliminuje przesunięcia, które mogłyby zafałszować miary latencji czy synchronii.

W przetwarzaniu wstępny typowo wchodzą kroki usuwania artefaktów i poprawy stosunku sygnału do szumu: filtracja pasmowa dla sygnałów fizjologicznych, korekcja dryftu i interpolacja brakujących próbek w danych okulograficznych, redukcja szumów w sygnale audio oraz usuwanie przebiegów ruchowych w danych przechwytywaniu ruchu. Ważne są też procedury wykrywania i oznaczania fragmentów niskiej jakości, jak na przykład utrata śledzenia oka, głośne zakłócenia w nagraniu, które należy raportować i wykluczać z analiz lub traktować osobno. Kolejnym etapem jest segmentacja danych według zdefiniowanych okien zadaniowych (ang. *event-aligned epochs*), co umożliwia porównanie tych samych zdarzeń między uczestnikami i warunkami. Na koniec z tych przygotowanych fragmentów wyodrębnia się konkretne cechy, takie jak fiksacje, latencje, parametry prozdyczne, miary dynamiki ruchu oraz metryki fizjologiczne, a wszystkie parametry wstępnych ustawiień, jak filtry, progi detekcji, kryteria wykluczeń, dokumentowane są dokładnie, aby zapewnić możliwość replikacji [20, 11].

2.5.2 Przykładowe metryki i reprezentacje cech

Dla celów diagnostycznych warto łączyć cechy pochodzące z kilku modalności, ponieważ każda z nich uchwyci inny aspekt interakcji społecznej. W obszarze wzrokowym analizowany jest na przykład stosunek czasu skupienia na twarzy lub oczach rozmówcy do czasu poświęconego elementom niespołecznym, liczbę i długość fiksacji oraz sekwencje przesunięć wzroku informującą o preferencjach uwagi i sposobie eksploracji sceny [16]. W domenie dialogowej można do analizy wykorzystać parametry akustyczne, takie jak średnia i odchylenie fundamentalnej częstotliwości (F0), zakres intonacji, tempo mowy, długość pauz oraz wskaźniki dysfluencyjne, ponieważ dostarczają informacji o pragmatyce i ekspresji werbalnej [11, 50]. Poszczególne metryki oraz ich reprezentacje omówiono w kolejnych podrozdziałach.

Wskaźnik uwagi społecznej

Udział czasu patrzenia na obszary społecznie istotne, takie jak twarz czy oczy rozmówcy, są fundamentalnym wskaźnikiem zainteresowania społeczną informacją. Metryka ta często silnie różnicuje osoby z ASD od osób kontrolnych w zadaniach społecznych, dla tego jest często stosowany w badaniach klinicznych. Wartości absolutne zależą jednak od typu bodźca, dlatego proponuje się traktować każdy konkretny próg wyłącznie jako heurystyczny punkt odniesienia [16, 25]. Do wyliczenia wskaźnika uwagi społecznej w danym okresie stosowany jest przedstawiony Równaniem 2.1.

$$\text{SA}_{\text{Ratio}} = \frac{N_{\text{soc}}}{N} \quad (2.1)$$

Znaczenie symboli:

- N – całkowita liczba próbek wzroku w analizowanym okresie,
- N_{soc} – liczba próbek w analizowanym okresie, w których punkt spojrzenia znajduje się w obszarze społecznie istotnym.

Liczba i średni czas fiksacji

Fiksacja to okres względnej stabilizacji spojrzenia, podczas którego układ wzrokowy skupia się na danym punkcie sceny i odbywa się najbardziej intensywne przetwarzanie wzrokowe. Liczba i długość fiksacji dostarczają informacji o strategii eksploracji oraz o trudności z odczytem sygnałów społecznych. Metryki te są standardem w badaniach psychologii poznawczej i badań nad ASD [12, 29]. W praktyce badawczej progi minimalnej długości fiksacji są stosowane, aby odróżnić krótkie, przejściowe spojrzenia od pełnoprawnych fiksacji, dlatego typowo stosowaną wartością startową jest $200ms$ [28]. Do wyliczenia średniego czasu wszystkich fiksacji, pozwala na uśrednienie wszystkich fiksacji, przedstawiony na Równaniu 2.2

$$\bar{D}_{\text{fix}} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k d_i \quad (2.2)$$

Znaczenie symboli:

- \bar{D}_{fix} – średni czas trwania fiksacji (ms),
- k – liczba wykrytych fiksacji,
- d_i – czas trwania i -tej fiksacji (ms).

Dyspersja spojrzeń

Dyspersja spojrzeń (ang. *Gaze Stability*) opisuje, jak stabilne jest skupienie uwagi. Duża dyspersja może oznaczać rozkojarzenie, skanowanie nie związane z zadaniem lub trudności w utrzymaniu kontaktu wzrokowego [28]. Metryka jest liczona przy pomocy miary średniej kwadratowej (ang. *Root mean square*, RMS) odchylenia punktów spojrzenia względem średniego punktu w przestrzeni 2D [29] przedstawiony na Równaniu 2.3. Dzięki Równaniu progi wykrycia stają się interpretowalne niezależnie od rozdzielczości i geometrycznych warunków stanowiska [28].

$$\text{GS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ((x_i - \bar{x})^2 + (y_i - \bar{y})^2)} \quad (2.3)$$

Znaczenie symboli:

- N – całkowita liczba próbek wzroku w analizowanym okresie,
- (x_i, y_i) – znormalizowane współrzędne punktu spojrzenia w próbce t ,
- (\bar{x}, \bar{y}) – średnie współrzędne punktów spojrzenia w analizowanym oknie.

Częstość mrugnięć

Częstość mrugnięć (ang. *Blink Rate*) jest wskaźnikiem stanu uwagi i pobudzenia oraz może wskazywać na unikanie kontaktu wzrokowego lub stres. Równanie 2.4 przedstawia prosty stosunek liczby wykrytych mrugnięć do czasu sesji. Zmiany w częstości mrugnięć pojawiają się przy stresie, wysokim obciążeniu poznawczym lub świadomym unikaniu kontaktu wzrokowego [21]. Średni przedział częstości mrugnięć na minutę w literaturze wynosi [10, 20], gdzie popularną wartością referencyjną jest 17 mrugnięć/min, ale wielkość ta zmienia się silnie z kontekstem zadania [21].

$$\text{BR} = \frac{B}{T} \quad (\text{mrugnięcia/min}) \quad (2.4)$$

Znaczenie symboli:

- B — liczba wykrytych zdarzeń mrugnięć w sesji;
- T — czas sesji wyrażony w minutach.

Sakkada

Sakkada to szybki, skokowy ruch gałek ocznych służący przemieszczeniu osi widzenia z jednego punktu zainteresowania na inny. W praktyce detekcja sakkad opiera się najczęściej na kryteriach prędkościowych, gdzie próbki, których chwilowa prędkość przekracza zadany próg, są oznaczane jako sakkady, a okresy między nimi jako fiksacje [28]. Typowe metryki sakkad obejmują liczbę sakkad na jednostkę czasu, średnią amplitudę sakkad w stopniach kątowych widzenia przedstawioną równaniem 2.5, czas trwania sakkady czy szczytową prędkość sakkady.

$$\overline{\text{SAC}}_{\text{Amp}} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \Delta_{t_j} \quad (2.5)$$

Znaczenie symboli:

- $\overline{\text{SAC}}_{\text{Amp}}$ — średnia amplituda wykrytych sakkad,
- M — liczba wykrytych sakkad, gdzie liczba chwili gdzie $\Delta_t \geq \theta_{\text{mov}}$,
- Δ_{t_j} — amplituda j -tej wykrytej sakkady, wyliczoną na podstawie Równaniu 2.6.

$$\Delta_t = \sqrt{(x_{t1} - x_{t2})^2 + (y_{t1} - y_{t2})^2} \quad (2.6)$$

Znaczenie symboli:

- Δ_t — odległość euklidesowa pozycji spojrzenia między próbками $t1$ i $t2$,
- $(x_{t1}, y_{t1}), (x_{t2}, y_{t2})$ — współrzędne spojrzenia w próbkach $t1$ i $t2$.

Częstotliwość podstawowa

Częstotliwość podstawowa określana symbolem F_0 , czyli częstotliwość drgań fałdów głosowych wytwarzających dźwięk, mierzona w hercach. Jest to podstawowy akustyczny wskaźnik wysokości dźwięku [9]. Na podstawie tej wartości można wyznaczyć metryki, takie jak śrenia $F_{0\text{mean}}$ czy odchylenie standardowe $F_{0\text{sd}}$ które są odpowiednio przedstawione na Równaniu 2.7 i 2.8.

$$F_{0\text{mean}} = \frac{1}{|\mathcal{V}|} \sum_{t \in \mathcal{V}} F_{0t} \quad (2.7)$$

Znaczenie symboli:

- $F0_{\text{mean}}$ – średnia częstotliwość podstawowa głosu (Hz),
- $F0_t$ – wartość częstotliwości podstawowej w ramce t (Hz),
- \mathcal{V} – zbiór ramek zawierających fonację (ang. *voiced frames*),
- $|\mathcal{V}|$ – liczba ramek w zbiorze \mathcal{V} .

$$F0_{\text{sd}} = \sqrt{\frac{1}{|\mathcal{V}| - 1} \sum_{t \in \mathcal{V}} (F0_t - F0_{\text{mean}})^2} \quad (2.8)$$

Znaczenie symboli:

- $F0_{\text{sd}}$ – odchylenie standardowe częstotliwości podstawowej (Hz),
- $F0_t$ – wartość częstotliwości podstawowej w ramce t (Hz),
- $F0_{\text{mean}}$ – średnia częstotliwość podstawowa (Hz),
- \mathcal{V} – zbiór próbek z dźwiękiem dźwięcznym (ang. *voiced frames*),
- $|\mathcal{V}|$ – liczba ramek w zbiorze \mathcal{V} .

Zmienna częstotliwości podstawowej

Zmienna częstotliwości podstawowej (ang. *F0 Variability*) stanowi kluczowy wskaźnik prozodyczny, odzwierciedlający naturalność, ekspresję emocjonalną i rytm mowy. U osób z ASD obserwuje się często obniżoną zmienność F0, co przekłada się na bardziej monotonną i mniej modulowaną intonację [1, 11]. Zmienność ta może być opisana przez względny stosunek odchylenia standardowego do wartości średniej, a dla ujednolicenia percepcyjnego skali przeliczana jest na jednostki semitonów przy wykorzystaniu Równania 2.9, zgodnie z logarytmiczną zależnością między częstotliwością a wysokością dźwięku [8, 19, 1]. Przykładowe równanie 2.10 przedstawia wartość zmienności częstotliwości podstawowej.

$$s = 12 \lg_2 \left(\frac{f_1}{f_2} \right) \quad (2.9)$$

Znaczenie symboli:

- s – różnica w semitonach między częstotliwościami f_1 i f_2 ;
- f_1, f_2 – częstotliwości w Hz.

$$F0_{\text{Variability}} = s = \frac{12}{\ln 2} \cdot \frac{F0_{\text{sd}}}{F0_{\text{mean}}} = 17.313 \cdot \frac{F0_{\text{sd}}}{F0_{\text{mean}}} \quad (2.10)$$

Znaczenie symboli:

- $F0_{\text{Variability}}$ – zmienność częstotliwości podstawowej,
- $F0_{\text{sd}}$ – odchylenie standardowe częstotliwości podstawowej (Hz),
- $F0_{\text{mean}}$ – średnia częstotliwość podstawowa (Hz),
- s – różnica w semitonach między częstotliwościami przedstawiona w Równaniu 2.9

Zakres tonu

Zakres tonu opisuje różnicę między maksymalną i minimalną zarejestrowaną wartością $F0$ i charakteryzuje mobilność intonacyjną mówiącego. Zaprezentowane równanie 2.11, również jest przeliczana na jednostki semitonów przy wykorzystaniu Równania 2.9.

$$F0_{\text{range}} = \frac{12}{\ln 2} \cdot \frac{F0_{\text{max}} - F0_{\text{min}}}{F0_{\text{mean}}} = 17.313 \cdot \frac{F0_{\text{max}} - F0_{\text{min}}}{F0_{\text{mean}}} \quad (2.11)$$

Znaczenie symboli:

- $F0_{\text{range}}$ – zasięg tonu w semitonach,
- $F0_{\text{max}}$ – maksymalna wartość $F0$ w analizowanym fragmencie (Hz),
- $F0_{\text{min}}$ – minimalna wartość $F0$ w analizowanym fragmencie (Hz),
- $F0_{\text{mean}}$ – średnia wartość $F0$ wyliczona wartość z Równaniu 2.7 (Hz).

Wynik prozodii

Kombinacja zmienność częstotliwości ($F0_{\text{Variability}}$) i zakresu tonu ($F0_{\text{range}}$) odzwierciedla zarówno zmienność krótkokresową, jak i skalę modulacji intonacyjnej. W literaturze prosodycznej te dwie miary często łączone są przy opisie ekspresji mowy w ASD, tworząc wynik prozodii [1]. W Równaniu 2.12 można również zastosować wagi, aby zwiększyć nacisk na poszczególne elementy, przykładowo na zmienność częstotliwości, ponieważ lepiej oddaje nietypowości prozodyczne w ASD w mowie konwersacyjnej [1].

$$\text{PR}_{\text{Score}} = X \cdot F0_{\text{Variability}} + Y \cdot F0_{\text{range}} \quad (2.12)$$

Znaczenie symboli:

- PR_{Score} – skalarna miara prozodyczna ,
- $F0_{\text{Variability}}$ – zmienność częstotliwości podstawowej wyznaczonej z Równaniu 2.10,
- $F0_{\text{range}}$ – zakresu tonu wyznaczony z Równaniu 2.11,
- X, Y – współczynniki wagowe w Równaniu.

Drganie

Drganie (ang. *Jitter*) to miara krótkookresowej zmienności okresu drgań głosowych i jest wskaźnikiem nieregularności fonacji. Drganie jest używane w diagnostyce zaburzeń głosu i jako cecha akustyczna w badaniach mowy społecznej. Zmiany w drganiu mogą odzwierciedlać zaburzenia fonacyjne, napięcie mięśniowe lub trudności z kontrolą fonacji [54, 9]. Przedstawione równanie 2.13, służy do wyliczenia wartości procentowej lokalnego drgania w przedziale [0, 2] [8].

$$J_{\text{local}} = \frac{\sum_{i=2}^N \frac{|T_i - T_{i-1}|}{N-1}}{\sum_{i=1}^N \frac{T_i}{N}} \quad (2.13)$$

Znaczenie symboli:

- T_i – czas trwania okresu i -tej próbce (s),
- N – liczba okresów,

Migotanie

Migotanie (ang. *Shimmer*) to miara krótkookresowej zmienności amplitudy sygnału głosowego. Wyższe wartości tej miary sugerują niestabilną amplitudę, takie jak zaburzenia fonacyjne czy chrypka. Stosowany razem z drganiem dostarcza pełniejszego obrazu jakości fonacji [9]. Metody stosowane do określenia migotania są identyczne jak w przypadku drgania, z główną różnicą że drganie uwzględnia okresy, a migotanie bierze pod uwagę amplitudy [54], co prezentuje równanie 2.14.

$$Sh_{\text{local}} = \frac{\sum_{i=2}^N \frac{|A_i - A_{i-1}|}{N-1}}{\sum_{i=1}^N \frac{A_i}{N}} \quad (2.14)$$

Znaczenie symboli:

- A_i – amplituda odpowiadająca i -temu okresowi,
- N – liczba okresów.

Stosunek harmonicznych do szumu

Stosunek harmonicznych do szumu (ang. *Harmonic to Noise Ration*, HNR) kwantyfikuje, jaka część energii sygnału jest harmoniczna względem składowej szumowej. Wyższe wartości oznaczają czystszy, bardziej harmoniczny głos, gdzie niższe wartości, oznaczają więcej szumu w nagraniu, takie jak chrypka czy zaburzenia głosu. HNR jest powszechnie stosowaną miarą jakości fonacji [54, 9]. Przedstawione równanie 2.15 które służy do wyliczenia stosunku harmonicznego do szumu jest wariacją Równaniu przedstawionego przez Paul'a Boersma'na [7], która stosuje dłuższe sygnały danych [54].

$$\text{HNR} = 10 \lg_{10} \left(\frac{AC_V(T)}{AC_V(0) - AC_V(T)} \right) \quad (2.15)$$

Znaczenie symboli:

- $AC_V(T)$ – wartość szczytowa w pozycji indeksu odpowiadającej okresowi sygnału,
- $AC_V(0)$ – wartość globalna maksymalna.

2.5.3 Metody statystyczne i analizy porównawcze

W analizie danych diagnostycznych warto łączyć klasyczną eksplorację statystyki opisowe, wizualizacje rozkładów, identyfikacja braków i elementy odstające (ang. *outliers*) z modelami odpowiednimi do struktury danych - np. modele wielopoziomowe przy powtarzanych pomiarach lub danych z wielu ośrodków, które pozwalają rozdzielić wariancję między- i wewnętrzosobową oraz kontrolować zmienne zakłócające; praktyczne implementacje i wskazówki dotyczące tych modeli znajdują się w pracy Bates i in. [5]. W pracy "*Controlling the False Discovery Rate: A Practical and Powerful Approach to Multiple Testing*" [6] autorzy proponują, aby przy porównaniach wielokrotnych stosować kontrolę FDR przy błędach typu I, a wyniki prezentować z rozmiarami efektu i przedziałami ufności zamiast polegać wyłącznie na wartościach **p**.

2.5.4 Przegląd istniejących rozwiązań

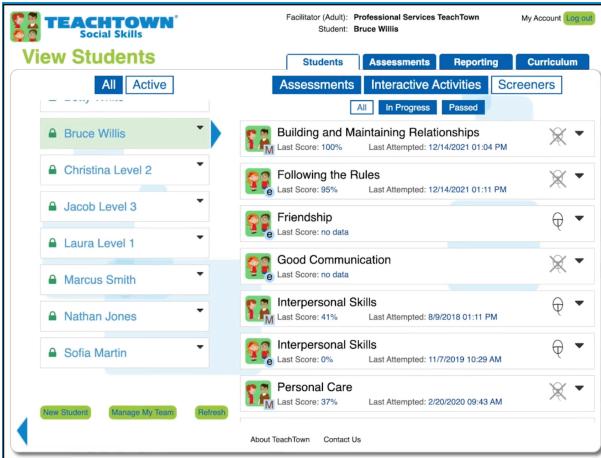
W tej części przedstawiono przegląd dostępnych rozwiązań technologicznych stosowanych w diagnostyce i wsparciu umiejętności społecznych u osób z ASD. Opisy koncentrują się na funkcjonalnościach tych rozwiązań oraz dowodach empirycznych.

TeachTown

TeachTown [52] widoczny na Rysunku 2.1 to komercyjna platforma edukacyjna zaprojektowana z myślą o dzieciach z zaburzeniami rozwojowymi, która łączy animowane scenariusze, ćwiczenia i moduły śledzenia postępów. System oferuje ustrukturyzowane lekcje mające na celu rozwijanie umiejętności społecznych i poznawczych w warunkach niskiego stresu, a jego wdrożenie w szkołach i ośrodkach terapeutycznych wynika z praktycznej użyteczności i łatwości integracji z planem zajęć. Dostępne dowody naukowe [61] wskazują, że efektywność programów tego typu zależy w dużej mierze od sposobu ich zastosowania oraz jakości protokołu badawczego stosowanego do oceny skutków.

The Social Express

The Social Express [22] widoczny na Rysunku 2.2 to komercyjna platforma oparta na sekwencjach wideo i interaktywnych ćwiczeniach, stworzona, żeby uczyć reguł społecznych



Rysunek 2.1: Wygląd aplikacji TeachTown podczas użytkowania



Rysunek 2.2: Wygląd aplikacji The Social Express podczas użytkowania

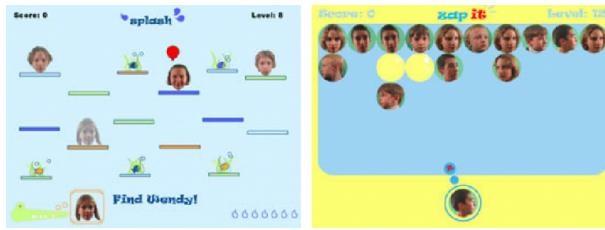
i rozpoznawania emocji w kontekstach codziennych. Materiał prezentowany jest w formie krótkich scenek i ilustruje różne strategie reagowania, co ułatwia dzieciom i młodzieży z ASD zrozumienie społecznych oczekiwaniń oraz trening odpowiednich reakcji.

Let's Face It! (LFI!)

Let's Face It! [37] to zestaw interaktywnych gier komputerowych i testów zaprojektowanych do treningu i oceny zdolności rozpoznawania twarzy oraz emocji u dzieci z ASD. Aplikacja widoczna na Rysunku 2.3 oferuje różnorodne zadania wymagające analizy cech twarzy i rozróżniania wyrażeń emocjonalnych, co w badaniach wykorzystywano zarówno do interwencji, jak i do standaryzowanej oceny zdolności percepcyjnych, przy czym efekty zależały od konstrukcji badania i charakterystyki uczestników [57].

Model Me Interactive

Model Me Interactive [32] widoczny na Rysunku 2.4 dostarcza gotowych materiałów wideo, w których pożądane wzorce zachowań społecznych są prezentowane w jasno zdefiniowanych przykładach, a następnie włączane do ćwiczeń praktycznych. Takie podejście ułatwia naukę poprzez obserwację i powtarzanie oraz jest chętnie wykorzystywane



Rysunek 2.3: Wygląd gier w aplikacji Let's Face It!



Rysunek 2.4: Wygląd aplikacji Model Me Interactive podczas użytkowania

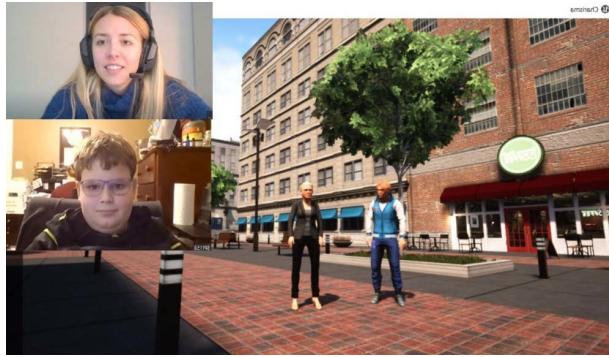
w praktyce edukacyjnej jako element programów terapeutycznych, zwłaszcza tam, gdzie obserwacja wzorców zachowania i ich imitacja są podstawowym mechanizmem zmiany.

Charisma

Charisma [13] to platforma oparta na koncepcji awatarowego socjalnego treningu (ang. *avatar social coaching*), w której użytkownik wchodzi w interakcję z wirtualnym partnerem odgrywającym określone role społeczne, jak na przykład kasjera albo kolegę z pracy. W praktyce system ten łączy interaktywny interfejs prezentujący postać 3D z modułami rozpoznawania i analizy zachowania użytkownika. W zależności od implementacji może to obejmować rozpoznawanie mowy (ang. *speech-to-text*), analizę prozodii, rejestrację i analizę czasu reakcji, a także mechanizmy dialogowe sterujące zachowaniem awatara. Dzięki temu Charisma umożliwia prowadzenie ustrukturyzowanych scenariuszy społecznych w sposób powtarzalny i mierzalny, tak aby terapeut lub badacz mógł zaplanować zadania o różnym stopniu złożoności i porównać zachowania użytkownika między sesjami.

Podsumowanie

Podsumowując przegląd dostępnych aplikacji i platform, można wyróżnić dwa kluczowe czynniki decydujące o ich wartości diagnostycznej: z jednej strony prostota aplikacji i procedury badawczej, która wpływa na dostępność, powtarzalność i komfort uczestników, a z drugiej strony, staranne dobranie bodźców i ich kontrola, które determinują



Rysunek 2.5: Wygląd aplikacji Charisma podczas użytkowania

trafność i interpretowalność pozyskiwanych miar. Połączenie obu tych aspektów pozwala na uzyskanie danych użytecznych w procesie walidacji narzędzi diagnostycznych.

2.6 Przegląd literatury

2.6.1 Projektowanie scenariuszy diagnostycznych

Scenariusze diagnostyczne powinny odtwarzać konkretne wyzwania społeczno-komunikacyjne, takie jak inicjacja i utrzymanie rozmowy czy rozpoznawanie emocji, umożliwiać manipulację pojedynczym parametrem, na przykład intensywnością kontaktu wzrokowego awatara, oraz zawierać jasno zdefiniowane markery zdarzeń do synchronizacji danych. Autorzy pracy "*Measuring social attention and motivation in autism spectrum disorder using eye-tracking: Stimulus type matter*" [16] rekomendują sekwencję warunków o rosnącej złożoności, zaczynając od statycznych, potem dynamicznych, kończąc na interakcyjnych. W pracy Frost Karlssona i in. [25] zalecają, aby podczas prowadzenia scenariuszy diagnostycznych łączyć je z narzędziami klinicznymi ADOS/ADI-R w celu walidacji metryk oraz w opisie scenariuszy należy jawnie podać: instrukcje dla uczestnika, kryteria zakończenia, procedury awaryjne oraz sposób rejestracji i oznaczania zdarzeń.

2.6.2 Współprojektowanie scenariuszy

Praca Gabrielli i współautorów [26] opisuje proces współpracy wieloosobowej gry przygodowej w wirtualnej rzeczywistości przeznaczonej dla nastolatków z ASD i stanowi użyteczny przykład, jak angażowanie użytkowników na wszystkich etapach tworzenia wpływa na trafność i akceptowalność finalnego rozwiązania. Autorzy zastosowali mieszane metody, gdzie zespół badawczy prowadził warsztaty projektowe z nastolatkami, opiekunami i specjalistami, iteracyjnie prototypował fragmenty gry, testował je w sesjach użyteczności oraz zbierał dane jakościowe i ilościowe. Dzięki temu podejściu twórcy mogli wielokrotnie dostosowywać treść scenariuszy, mechanikę rozgrywki oraz interfejs tak, by odpowiadały rzeczywistym potrzebom i ograniczeniom grupy docelowej. Głównym wnio-

skiem badania było to, że udział użytkowników w procesie projektowym prowadzi do rozwiązań lepiej tolerowanych sensorycznie, bardziej realistycznych społecznie i bardziej motywujących dla nastolatków z ASD, a jednocześnie ułatwia identyfikację elementów scenariusza, które mogłyby wywoływać dyskomfort lub być źle interpretowane. W praktyce oznaczało to między innymi modyfikację tempa dialogów, uproszczenie sygnałów wizualnych, dopracowanie zachowań postaci niezależnych oraz wprowadzenie mechanizmów umożliwiających dostosowanie poziomu trudności przez opiekuna.

2.6.3 Wirtualna rzeczywistość

W literaturze pojawiają się konkretne przykłady badań, które ilustrują możliwości i granice VR w kontekście oceny funkcjonowania społecznego. W pracy "*Virtual Reality Training of Social Skills in Adults with Autism Spectrum Disorder: An Examination of Acceptability, Usability, User Experience, Social Skills, and Executive Functions*" [34] autorzy przeprowadzili pilotażowe badanie z 25 dorosłymi osobami z ASD, w którym uczestnicy odbywali neuropsychologiczną ocenę oraz trzy sesje VR treningu umiejętności społecznych, obejmujące pięć scenariuszy z trzema poziomami trudności każdy. Badanie raportowało wysoką akceptowalność, dobrą użyteczność systemu i pozytywne doświadczenia użytkowników, a jednocześnie wykazało istotne korelacje między wynikami w scenariach społecznych a wynikami w testach wykonawczych, między innymi pamięć robocza i umiejętności planowania przewidywały poziom funkcjonowania i postrzeganą użyteczność systemu, co sugeruje, że określone funkcje poznawcze mogą wpływać na sposób korzystania z VR i interpretację pozyskanych metryk.

2.6.4 Książki z rozszerzoną rzeczywistością

W pracy „*Enhancing Social Skills in Autism Students with Augmented-Reality Picture-books*” [51] autorzy opisują zastosowanie interaktywnych książek obrazkowych rozszerzonej rzeczywistości (ang. *Augmented Reality*, AR) jako narzędzia wspierającego naukę umiejętności społecznych uczniów z autyzmem. Materiały AR wzbogacają tradycyjne ilustracje o animacje i podpowiedzi kontekstowe, co zwiększa atrakcyjność zadania i kieruje uwagę uczestników na kluczowe elementy interakcji, jak mimikę czy intencje postaci. Badanie rapportuje poprawę zaangażowania uczestników oraz lepsze wyniki w wybranych zadaniach społecznych po interwencji, co sugeruje, że książki obrazkowe z rozszerzoną rzeczywistością mogą być efektywnym, niskoinwazyjnym środkiem dydaktycznym w pracy z dziećmi w spektrum.

2.6.5 Aplikacje komputerowe

Przegląd systematyczny Ramdoss i współautorów [47] wykazał, że interwencje komputerowe mogą przynosić korzyści w zakresie umiejętności społecznych i emocjonalnych u osób z ASD, aczkolwiek efekty są heterogeniczne i zależą od jakości interwencji, protokołu badawczego oraz cech uczestników. Dodatkowo autorzy uznali, że praktyczne zalety w kontekście diagnostycznym wynikają z niskiego progu sprzętowego, relatywnie prostych procedur kalibracji, takich jak śledzenie wzroku oraz możliwości szerokiego udostępniania i łatwej replikacji scenariuszy testowych. W praktyce oznacza to, że aplikacje ekranowe są obiecującym narzędziem, szczególnie do badań przesiewowych i wstępnych ocen.

2.6.6 Gry poważne

Przegląd systematyczny przeprowadzony przez Carneiro i współautorów [14] koncentruje się na grach poważnych przeznaczonych do rozwijania umiejętności społecznych u dzieci i młodzieży z ASD i dostarcza syntetycznego obrazu dowodów empirycznych na temat ich efektywności. Autorzy analizowali różnorodne projekty, od prostych zadań treningowych po rozbudowane środowiska interakcyjne. Stwierdzili, że wiele gier wykazuje obiecujące efekty w zakresie zaangażowania uczestników oraz poprawy wybranych umiejętności społecznych, jednak wyniki są silnie zróżnicowane ze względu na heterogeniczność interwencji, różne miary wyników oraz często ograniczoną jakość metodologiczną badań, jak małe próby, brak grup kontrolnych czy krótki czas obserwacji.

2.6.7 Dynamiczne śledzenie wzroku

Praca Lahiri i współautorów [35] opisuje koncepcyjne i pilotażowe zastosowanie systemów VR w połączeniu z dynamicznym śledzeniem wzroku (ang. *gaze-sensitive VR*) dla dzieci z ASD, pokazując, że w czasie rzeczywistym można rejestrować trajektorie spojrzeń podczas interakcji i stosować adaptacyjne reakcje środowiska zależne od kierunku uwagi uczestnika. Autorzy raportują, że takie rozwiązania są technicznie wykonalne i dobrze przyjmowane w próbach pilotażowych, gdzie VR z kontrolą zależną od spojrzenia może zwiększać zaangażowanie i pozwalać na eksperymentalne manipulacje bodźcami społecznymi w sposób trudny do osiągnięcia w warunkach naturalnych. Pod względem diagnostyki wyniki sugerują, że systemy wrażliwe na spojrzenie mają potencjał dostarczać ilościowych, dynamicznych miar uwagi społecznej, które mogłyby uzupełniać tradycyjne obserwacje kliniczne.

Rozdział 3

Przedmiot pracy

3.1 Scenariusz badania

W stworzonym prototypowym środowisku badawczym znajduje się przygotowany scenariusz, w którym badany musi osiągnąć podany cel, aby ukończyć badanie. W scenariuszu znajdują się punkty kontrolne, które mówią o postępie scenariusza dla prowadzącego badanie.

3.1.1 Cel zadania

Celem scenariusza jest przeprowadzenie krótkiej interakcji społecznej z ekspedientką kina w kontekście zakupu biletu. W scenariuszu okazuje się, że zabrakło miejsca na film, na który badany chciał iść i musi pójść na alternatywny film zaproponowany przez ekspedientkę. Zadanie ma na celu wywołanie typowych sekwencji komunikacyjnych takich jak inicjacja, odpowiedź, negocjacja alternatywy, odpowiedź na ofertę dodatkową oraz potwierdzenie i zamknięcie transakcji. Taki scenariusz pozwala na zarejestrowanie zachowań:

- umiejętność adaptacji do zmian w sytuacji,
- inicjatywy komunikacyjnej,
- zmiany kierunku spojrzeń w momentach krytycznych,
- zmian w mowie.

3.1.2 Punkty kontrolne zadania

Punkty kontrolne, które definiują istotne etapy przebiegu scenariusza:

1. **Zapytanie o seans:** ekspedientka pyta, na który seans badany chce kupić bilet (początek interakcji).

2. **Informacja o braku miejsc oraz propozycja alternatywy:** ekspedientka informuje o wyprzedanym seansie i proponuje alternatywne tytuły oraz pyta o wybór.
3. **Oferta dodatkowa:** ekspedientka proponuje zakup popcornu i napoju w promocji.
4. **Potwierdzenie i zamknięcie:** finalne podsumowanie zamówienia i zakończenie scenariusza.

3.1.3 Ukończenie zadania

Po ukończeniu scenariusza, program po zebraniu danych z śledzenia wzroku oraz mikrofonu, analizuje wyniki i zapisuje je do pliku. Szczegółowa analiza danych i metryk znajduje się w kolejnych podrozdziałach tego rozdziału.

3.2 Zastosowane narzędzia

3.2.1 Środowisko deweloperskie

Program został zrealizowany w silniku Unity [53]. Wybór Unity podyktowany był kilkoma przesłankami praktycznymi: natychmiastowa dostępność narzędzi do renderingu 2D/3D i animacji, łatwość budowy scenariuszy interakcyjnych oraz szeroki ekosystem wtyczek i możliwości integracji z urządzeniami zewnętrznymi, takimi jak kamera, mikrofon czy gogle wirtualnej rzeczywistości. Unity ułatwia również szybkie prototypowanie interfejsu badawczego, rejestrowanie zdarzeń i eksport wyników w formatach przyjaznych do dalszej analizy.

3.2.2 Biblioteki i integracje sprzętowe

W prototypie wykorzystano bibliotekę UnitEye [58, 59] jako warstwę integracyjną dla modułu śledzenia wzroku w silniku Unity. UnitEye w projekcie współpracuje z rozwiązaniem Holistic Barracude [18], która służy do sterowania i odczytu danych z twarzy oraz oczu. UnitEye umożliwia pozyskiwanie znormalizowanych współrzędnych punktu, w który patrzy badany, wykrywanie mrugnięć oraz identyfikację obiektu, na którym skupiony jest wzrok uczestnika.

3.2.3 Programy zewnętrzne

Do analizy akustycznej nagrań wykorzystano program Praat [9]. Praat został wybrany ze względu na jego dojrzałość, publiczną dokumentację i powszechną akceptację w literaturze, co ułatwia porównywalność wyników oraz reprodukowalność procedur przetwarzania akustycznego.

3.3 Wykorzystane metryki

W tym rozdziale znajdują się metryki wykorzystane w prototypie. Na podstawie zebrańnych danych z śledzenia wzroku oraz programu Praat[9] do analizy mowy wykorzystano:

- **Wskaźnik uwagi społecznej** (SA_{Ratio}) – bezpośrednio odczytywany z próbek dostarczanych przez UnitEye,
- **Liczba fiksacji** (D_{fix}) – wykrycie odbywa się na podstawie próbek pochodzących z UnitEye,
- **Średni czas fiksacji** (\bar{D}_{fix}) – liczony na podstawie próbek pochodzących z UnitEye,
- **Dispersja spojrzeń** (GS) – obliczana na współrzędnych (x, y) dostarczanych przez UnitEye,
- **Częstość mrugnięć** (BR) – liczba wykrytych mrugnięć bazuje na flagach detekcji udostępnionych przez UnitEye,
- **Sakkady** (SAC) – amplituda sakkad pobranych z UnitEye,
- **Średnia częstotliwość podstawowa** ($F0_{mean}$) – średnia jest obliczana w programie Praat,
- **Odchylenie standardowe częstotliwości podstawowej** ($F0_{sd}$) – wartość wyliczana w programie Praat,
- **Zmienność częstotliwości podstawowej** ($F0_{Variability}$) – przybliżona wartość metryki w semitonach pozyskana przy użyciu programu Praat,
- **Zakres tonu** ($F0_{range}$) – zakres częstotliwości podstawowej nagrania, obliczona na podstawie wyników Praat,
- **Drganie** (J_{local}) – wartość lokalnego drgania uzyskiwana w programie Praat na podstawie nagrania,
- **Migotanie** (Sh_{local}) – wartość lokalnego migotania uzyskiwana w programie Praat na podstawie nagrania.
- **Stosunek harmonicznych do szumu** (HNR) – wartość uzyskiwana w programie Praat na podstawie nagrania.

3.3.1 Ocena ryzyka ASD

Ocena ryzyka ASD (ang. *ASD risk score*) jest metryką agregacyjną zaprojektowaną w celu skonsolidowania wybranych rejestrowanych metryk w jedną, łatwą do interpretacji wartość. Równanie agregujące 3.1 sumuje poszczególne składowe ocenione w skali $[0, 1]$, a następnie przekształca je na skalę $[0, 100]$ przez zastosowane wagi. Na podstawie uzyskanego wyniku zostaje przypisany poziom ryzyka w Równaniu 3.8. Przyjęte wagi we Równaniu 3.1 mają charakter eksperymentalny i zostały dobrane na podstawie przeglądu literatury oraz praktycznego znaczenia poszczególnych modalności. Wagi te odzwierciedlają przyjęte założenia, gdzie większy priorytet nadano miarom związanym z uwagą społeczną i fiksacjami, które w badaniach nad funkcjonowaniem społecznym często wykazują najsilniejsze i najbardziej powtarzalne różnice między grupami [16]. Cechy akustyczne i wskaźnik mrugnięć traktowane są jako uzupełniające informacje o umiarkowanym wpływie na końcowy wynik.

$$\begin{aligned} S = & 35 \cdot f_{\text{soc}} + 20 \cdot f_{\text{fix}} + 15 \cdot f_{\text{gaze}} + 5 \cdot f_{\text{blink}} \\ & + 15 \cdot f_{\text{prosody}} + 10 \cdot f_{\text{głos}} \end{aligned} \quad (3.1)$$

Znaczenie symboli:

- f_{soc} – przeskalowana wartość uwagi społecznej wyliczona z Równania 3.2,
- f_{fix} – przeskalowana wartość średniej długości fiksacji wyliczona z Równania 3.3,
- f_{gaze} – przeskalowana wartość dyspersji spojrzeń wyliczona z Równania 3.4,
- f_{blink} – przeskalowana wartość częstości mrugnięć wyliczona z Równania 3.5,
- f_{prosody} – przeskalowana wartość wyniku prozodii wyliczona z Równania 3.6,
- $f_{\text{głos}}$ – przeskalowana wartość jakości głosu wyliczona z Równania 3.7,

$$f_{\text{soc}} = \begin{cases} 1 - \frac{\text{SA}_{\text{Ratio}}}{0.4}, & \text{gdy } \text{SA}_{\text{Ratio}} < 0.4, \\ 0, & \text{w przeciwnym razie.} \end{cases} \quad (3.2)$$

Znaczenie symboli:

- f_{soc} – przeskalowana wartość uwagi społecznej,
- SA_{Ratio} – metryka wskaźnika uwagi społecznej na podstawie Równania 2.1,
- 0.4 – próg metryki wskaźnika uwagi społecznej.

$$f_{\text{fix}} = \begin{cases} 1 - \frac{\bar{D}_{\text{fix}}}{200}, & \text{gdy } \bar{D}_{\text{fix}} < 200 \text{ ms,} \\ 0, & \text{w przeciwnym razie.} \end{cases} \quad (3.3)$$

Znaczenie symboli:

- f_{fix} – przeskalowana wartość średniego czasu fiksacji,
- \bar{D}_{fix} – metryka średniego czasu fiksacji na podstawie Równania 2.2,
- $200ms$ – próg metryki średniego czasu fiksacji.

$$f_{\text{gaze}} = \text{clamp}\left(\frac{GS}{0.1}, 0, 1\right). \quad (3.4)$$

Znaczenie symboli:

- f_{gaze} – przeskalowana wartość dyspersji spojrzeń,
- GS – metryka dyspersji spojrzeń na podstawie Równania 2.3,
- 0.1 – próg metryki dyspersji spojrzeń.

$$f_{\text{blink}} = \text{clamp}\left(\frac{|BR - 17|}{17}, 0, 1\right) \quad (3.5)$$

Znaczenie symboli:

- f_{blink} – przeskalowana wartość częstości mrugnięć,
- BR – metryka częstości mrugnięć na podstawie Równania 2.4,
- 17 – próg metryki częstości mrugnięć.

$$f_{\text{prosody}} = 1 - PR_{\text{Score}} = 0.6 \cdot F0_{\text{Variability}} + 0.4 \cdot F0_{\text{range}} \quad (3.6)$$

Znaczenie symboli:

- f_{prosody} – przeskalowana wartość wyniku prozodii,
- PR_{Score} – metryka wyniku prozodii na podstawie Równaniu 2.12,
- $0.6, 0.4$ – wagi Równaniu wyniku prozodii.

$$f_{\text{głos}} = 1 - \frac{HNR_{\text{norm}} + J_{\text{norm}}}{2} = \frac{\text{clamp}\left(\frac{HNR_{\text{mean}}}{30}, 0, 1\right) + (1 - \text{clamp}\left(\frac{J_{\text{local}}}{0.02}, 0, 1\right))}{2} \quad (3.7)$$

Znaczenie symboli:

- f_{glos} – przeskalowana wartość wyniku jakości głosu,
- HNR_{norm} – znormalizowana metryka stosunku harmonicznego do szumu,
- J_{norm} – znormalizowana metryka drgań,
- HNR_{mean} – średnia wartość metryki stosunku harmonicznego do szumu,
- J_{local} – wartość metryki drgań na podstawie równania 2.13,
- 30, 0.02 – progi metryk.

$$S_{\text{risk}} = \begin{cases} \text{Niskie,} & \text{jeśli } s < 30, \\ \text{Średnie,} & \text{jeśli } 30 \leq s < 60, \\ \text{Wysokie,} & \text{jeśli } s \geq 60. \end{cases} \quad (3.8)$$

3.4 Działanie programu

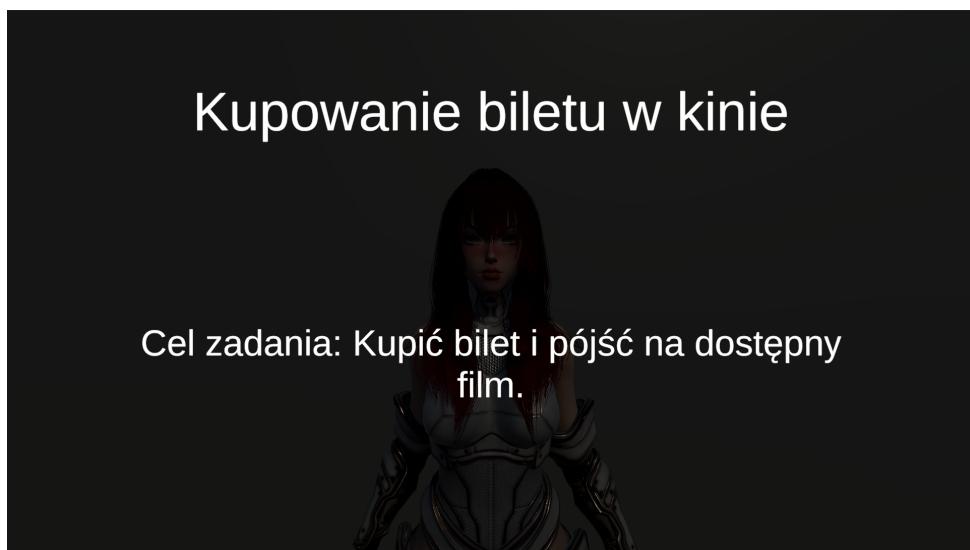
W tym rozdziale opisano interfejs użytkownika oraz typowy przebieg sesji eksperymentalnej. Aplikacja uruchamiana jest jako program okienkowy oraz wykorzystuje dwa ekrany monitorów, gdzie jeden z monitorów jest przeznaczony dla badanego, a drugi dla prowadzącego badanie.

3.4.1 Widok badanego

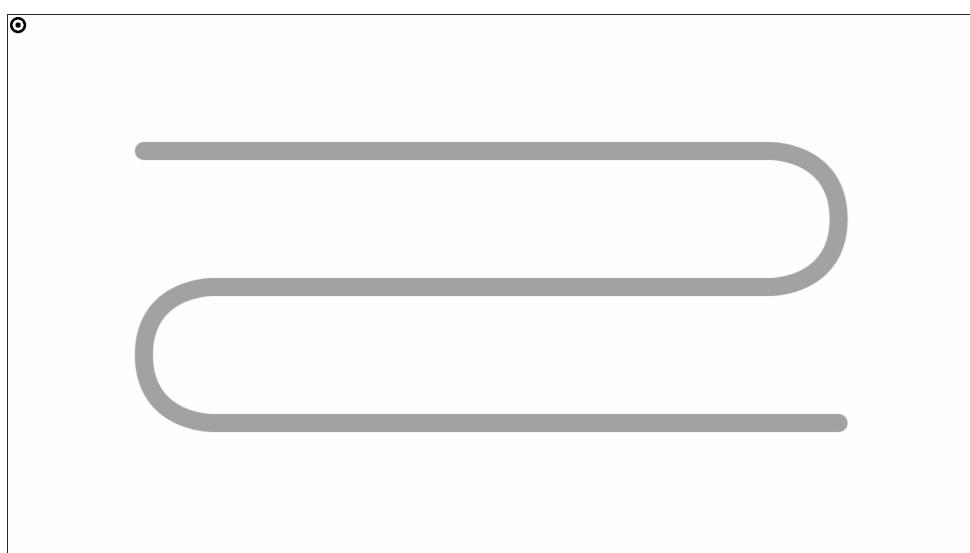
Badany uczestnik widzi jeden duży, prosty ekran z awatarem oraz informacją o zadaniu. Na początku sesji wyświetlany jest ekran powitalny z nazwą scenariusza oraz krótką instrukcją co można zobaczyć na Rysunku 3.1. W czasie właściwego scenariusza awatar odgrywa kwestie dialogowe zgodne z miejscem w scenariuszu, na które badany musi odpowiadać do mikrofonu.

3.4.2 Ekran kalibracji badanego

Przed rozpoczęciem scenariusza w programie uruchamianego jest z ekranu widocznym na Rysunku 3.1 procedura kalibracji wzroku i pozycji głowy. Widok kalibracji, przedstawiony na Rysunku 3.2 prezentuje czarny punkt, za którym badany musi podążyć wzrokiem. W kalibracji znajdują się cztery kombinacje układów ścieżek, po których punkt się porusza. Każda kombinacja jest wykonywana w dwóch próbach.



Rysunek 3.1: Wygląd aplikacji przed rozpoczęciem scenariusza



Rysunek 3.2: Wygląd aplikacji w trakcie kalibracji

3.4.3 Widok prowadzącego

Ekran operatorski widoczny na Rysunku 3.3 jest podzielony na cztery główne części widoczne jednocześnie. Każda sekcja ma swoją rolę.

Kamera badanego

W tym oknie operator widzi strumień wideo kamery, na której jest widoczny uczestnik. Kamera ta służy do kontroli zachowania badanej osoby, takich jak gesty czy ewentualne zakłóczenia. Dodatkowo kamera, która jest widoczna, jest używana do detekcji pozycji głowy oraz śledzenia wzroku.

Podgląd ekranu badanego

Ten panel pokazuje dokładnie to, co widzi badany na swoim ekranie, a także nałożoną nakładkę ścieżki spojrzeń oraz punkt fiksacji, przedstawiony jako czerwony celownik. Operator dzięki temu widzi w czasie rzeczywistym punkt fiksacji trzyma się twarzy awatara, czy często zbacza.

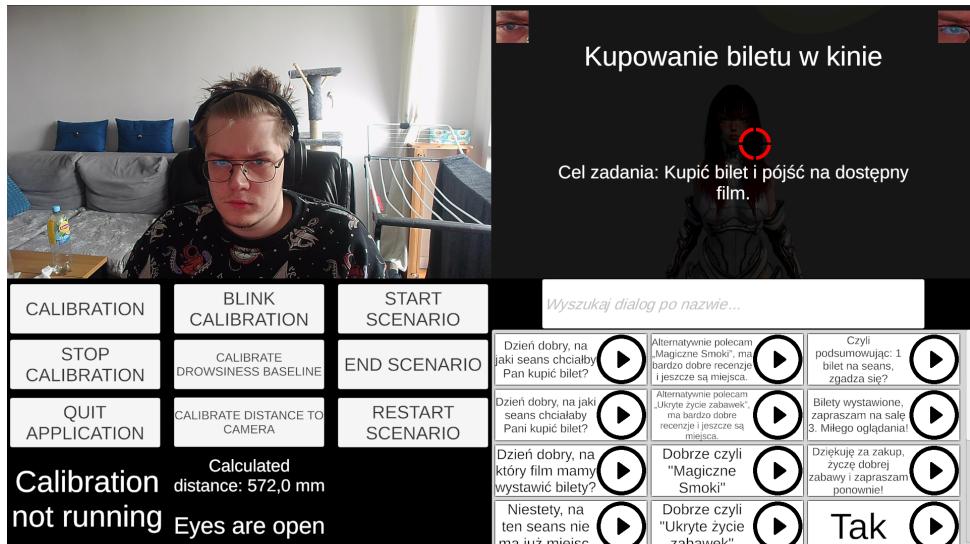
Panel dialogów i odtwarzania

Panel dialogów zawiera siatkę przycisków odpowiadających dostępnym wypowiedziom awatara w scenariuszu. Operator musi manualnie uruchamiać pojedyncze kwestie, zgodnie z postępem scenariusza. Dodatkowo, dostępne są wyszukiwarka dialogów oraz pasek przewijania, które pomagają znaleźć odpowiedni dialog przy dużej liczbie opcji.

Panel sterowania

Panel sterowania posiada odpowiednio przyciski:

- “CALIBRATION” – Służy do uruchomienia kalibracji śledzenia wzroku. Na dole panelu wyświetlna jest informacja o postępie kalibracji oraz instrukcje dotyczące kolejnych kroków.
- “STOP CALIBRATION” – Służy do przedwczesnego zakończenia kalibracji.
- “QUIT APPLICATION” – Służy do zamknięcia aplikacji.
- “BLINK CALIBRATION” – Umożliwia skalibrowanie momentu, w którym badany ma zamknięte oczy. Aby kalibracja przebiegła prawidłowo, badany musi zamknąć oczy, a prowadzący badanie naciska odpowiedni przycisk. Dodatkowo na dole panelu pojawia się informacja o statusie zamknięcia oczu badanego.



Rysunek 3.3: Wygląd ekranu prowadzącego badanie

- “DROWSY CALIBRATION” – Służy do kalibracji stanu przymkniętych oczu. W tym celu badany powinien przez 5 sekund mieć oczy do połowy otwarte, czyli tak zwane przymrużone.
- “CALIBRATE DISTANCE TO CAMERA” – Służy do kalibracji odległości twarzy od kamery. Do prawidłowej kalibracji zalecana jest odległość 500mm. Na dole panelu wyświetlna jest na bieżąco aktualna odległość twarzy od kamery.
- “START SCENARIO” – Służy do rozpoczęcia scenariusza.
- “END SCENARIO” – Służy do zakończenia scenariusza i zapisania wyników do plików.
- “RESTART SCENARIO” – Służy do zresetowania scenariusza.

3.4.4 Logowanie i formaty danych

Po zakończonym scenariuszu program zapisuje do plików:

- dane zebrane ze śledzenia wzroku przez kamerę w formacie *CSV*,
- nagranie audio badanego w formacie *WAV*,
- dane końcowego wyniku w formacie *CSV*.

Rozdział 4

Badania

Celem rozdziału jest opis przeprowadzonych badań, mających na celu wstępna ewaluację prototypowego środowiska symulacyjnego interakcji społecznych oraz weryfikację hipotezy postawionej w Rozdziale 1.2. Rozdział zawiera metodykę badań, opis stanowiska badawczego, opis zbieranych danych, protokół badania oraz analizę wyników przeprowadzonych eksperymentów. Badanie ma charakter pilotażowy, którego celem jest przede wszystkim sprawdzenie, czy zaprojektowane środowisko umożliwia jednoczesne, wiarygodne rejestrowanie zachowań wzrokowych oraz parametrów mowy podczas kontrolowanej interakcji społecznej oraz czy zebrane w ten sposób metryki pozwalają na wychwycenie różnic pomiędzy osobami ze spektrum autyzmu a osobami neurotypowymi. Badania zostały zrealizowane we współpracy z wyspecjalizowanym centrum medycznym oraz lekarzem psychiatrą, który odpowiadał za dobór uczestników w grupie ASD, co znacząco podnosi wiarygodność zebranych danych w porównaniu z typowymi dla prac studenckich badaniami opartymi wyłącznie na samodeklaracji.

4.1 Metodyka badań

4.1.1 Cel badania

Celem badania było zebranie danych akustycznych oraz śledzenie wzroku uczestników podczas przygotowanego scenariusza eksperymentalnego w stworzonym środowisku badawczym, które umożliwia porównanie wyników pomiędzy grupą osób z zaburzeniami ze spektrum autyzmu (ASD) a grupą kontrolną osób typowo rozwijających się.

4.1.2 Scenariusz badania

W badaniu wykorzystano scenariusz przedstawiony w Rozdziale 3.1. Uczestnik wcielał się w rolę klienta kina, który chce kupić bilet na wybrany seans. W trakcie interakcji z wirtualną ekspedientką pojawia się informacja o braku miejsc na wybrany film, propozy-

cia alternatywy, a następnie oferta zakupu zestawu promocyjnego oraz finalne potwierdzenie i zamknięcie transakcji. Scenariusz zorganizowany jest wokół czterech punktów kontrolnych, odpowiadających kluczowym momentom komunikacji, którymi są inicjacja, negocjacja alternatywy, reakcja na ofertę dodatkową, zamknięcie. Taka struktura pozwala na obserwację zmian w zachowaniu wzrokowym i mowie w momentach wymagających od uczestnika adaptacji do zmieniającej się sytuacji. Każdy uczestnik badania musiał ukończyć cały scenariusz, aby jego dane mogły zostać włączone do analizy.

4.1.3 Protokół badania

Przebieg badania z każdym uczestnikiem wyglądał następująco:

1. Operator wita uczestnika, krótko opisuje cel badania oraz przedstawia środowisko badawcze.
2. Operator uruchamia aplikację badawczą i kalibruje odległość kamery oraz pozycję uczestnika względem monitora, tak aby zapewnić prawidłową pracę systemu śledzenia wzroku.
3. Przeprowadzana jest procedura kalibracji śledzenia wzroku, podczas której uczestnik podąża wzrokiem za punktami referencyjnymi na ekranie.
4. Po zakończonej kalibracji operator uruchamia scenariusz eksperymentalny. Uczestnik otrzymuje krótką instrukcję, że ma zachowywać się jak w rzeczywistej sytuacji zakupu biletu w kinie i odpowiadać na pytania ekspedientki.
5. Uczestnik przechodzi przez cały scenariusz. W tym czasie system automatycznie rejestruje dane z kamery śledzącej wzrok oraz nagrywa sygnał mowy z mikrofonu.
6. Po zakończeniu scenariusza operator zatrzymuje rejestrację i eksportuje wszystkie dane.

4.1.4 Opis stanowiska badawczego

Badania w obu grupach badawczych zostały przeprowadzone na komputerze osobistym z procesorem AMD Ryzen 7 4800U, 32 GB pamięci RAM i kartą graficzną NVIDIA GeForce RTX 2060. Do komputera został podpięty zewnętrzny mikrofon studyjny Midnight Blue Yeti z maksymalną obsługą 120 decybeli poziomu głośności oraz zewnętrzna kamera Live! Cam Sync 1080P V2 przechwytująca obraz 30 klatek na sekundę w jakości Full HD. W grupie kontrolnej jako ekran badanego został wykorzystany monitor 24 calowy Samsung Odyssey F24G35TFWUX, który posiada rozdzielczość ekranu 1920×1080 (Full HD) oraz odświeżanie ekranu 144Hz. W grupie ASD jako ekran badanego został wykorzystany monitor 22 calowy Fujitsu B22W-7 o rozdzielczości 1680×1050 i odświeżaniu

ekranu 60Hz. Ekran operatora nie ma wpływu na wyniki badań i służy jedynie do kontroli przebiegu eksperymentu. Uczestnik siedział w ustalonej odległości 500mm od monitora, a wysokość krzesła oraz pochylenie ekranu były dostosowywane tak, aby zapewnić wygodną pozycję i stabilne warunki rejestracji danych.

4.1.5 Opis oprogramowania

Stworzone środowisko badawcze wykorzystuje silnik graficzny Unity w wersji 2022.3.33f, bibliotekę UnitEye w wersji 1.0 oraz oprogramowanie Praat w wersji 6.4.44. Dokładne działanie programu jest opisane w rozdziale 3.4.

4.2 Zbiory danych

Z każdego ukończonego scenariusza uzyskano zestaw danych na podstawie wykorzystanych metryk:

- **Wskaźnik uwagi społecznej,**
- **Średni czas fiksacji,**
- **Liczba fiksacji,**
- **Dispersja spojrzeń,**
- **Częstość mrugnięć,**
- **Średnia amplituda sakkad,**
- **Znormalizowana zmienność częstotliwości podstawowej,**
- **Jakość głosu,**
- **Średnia częstotliwość podstawowa,**
- **Odchylenie standardowe częstotliwość podstawowej,**
- **Drganie,**
- **Migotanie.**
- **Stosunek harmoniczny do szumu.**

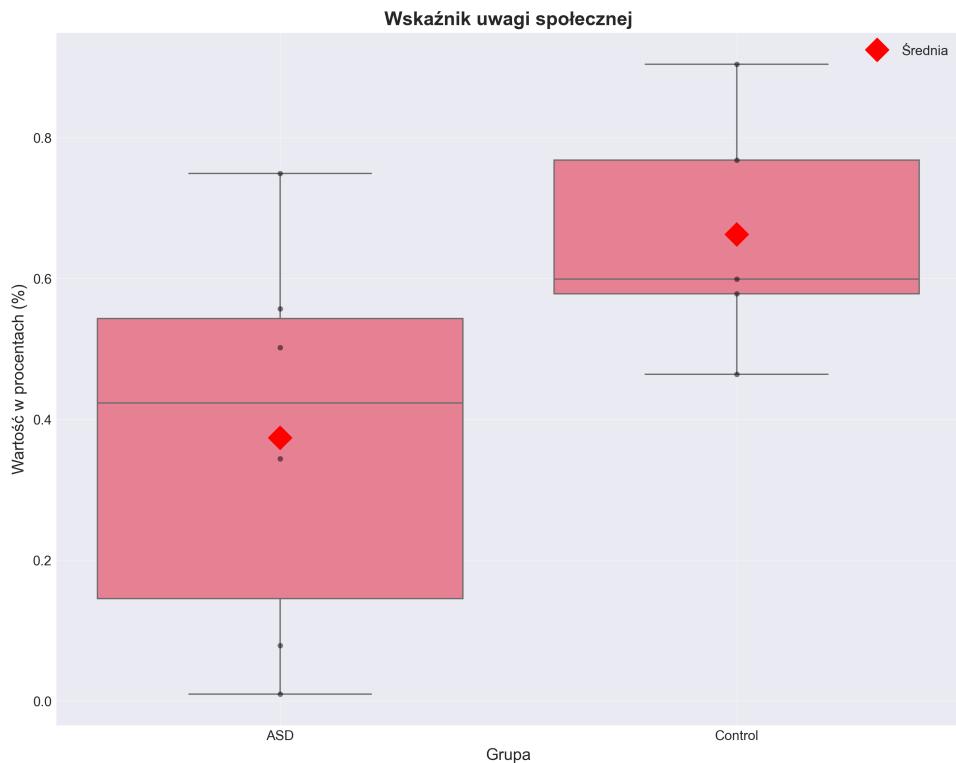
Zebrane dane zostały następnie wykorzystane do przygotowania wykresów, które przedstawiają różnice między grupami badaną i kontrolną oraz zależności pomiędzy poszczególnymi metrykami. Analiza wyników znajduje się w Rozdziale 4.3.

4.3 Wyniki

W badaniu wzięło udział 11 uczestników, w tym 6 osób ze stwierdzonym spektrum autyzmu (ASD) oraz 5 osób z grupy kontrolnej. Osoby z grupy ASD zostały przebadane we współpracy z centrum medycznym, które posiadały aktualną, potwierdzoną przez lekarza psychiatrę diagnozę zgodną z obowiązującymi kryteriami diagnostycznymi. Uzyskane dane pozwalają ocenić, czy zaproponowany scenariusz interakcji społecznej generuje zróżnicowane wzorce zachowania i mowy, potencjalnie użyteczne z punktu widzenia wspomagania diagnostyki ASD.

4.3.1 Wskaźnik uwagi społecznej

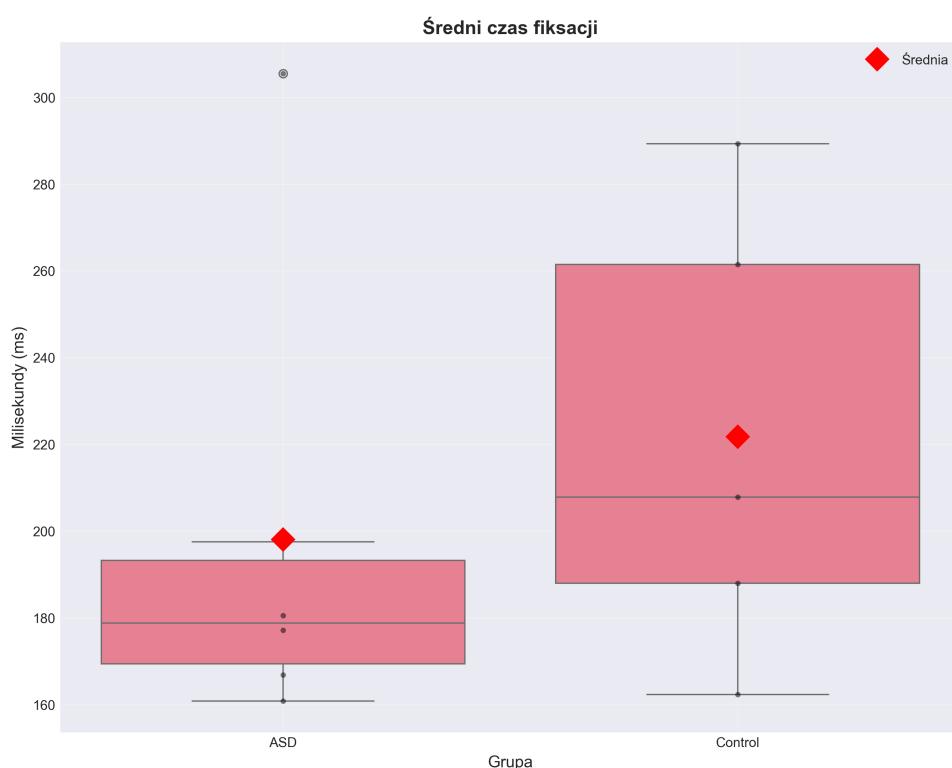
Rysunek 4.1 przedstawia rozkład wartości wskaźnika uwagi społecznej. Z wykresu wynika, że różnica między grupami jest bardzo wyraźna. Grupa osób z ASD ma wyraźnie niższy udział czasu patrzenia na bodźce społeczne, podczas gdy grupa kontrolna utrzymuje spojrzenie na obiektach społecznie istotnych znacznie dłużej, ze średnią wartością 0,66 w zakresie [0, 1]. W kontekście scenariusza oznacza to, że osoby z grupy ASD częściej kierują wzrok w stronę tła, zamiast utrzymywać uwagę na ekspedientce i przebiegu interakcji społecznej.



Rysunek 4.1: Wykres rozkładu wskaźnika uwagi społecznej

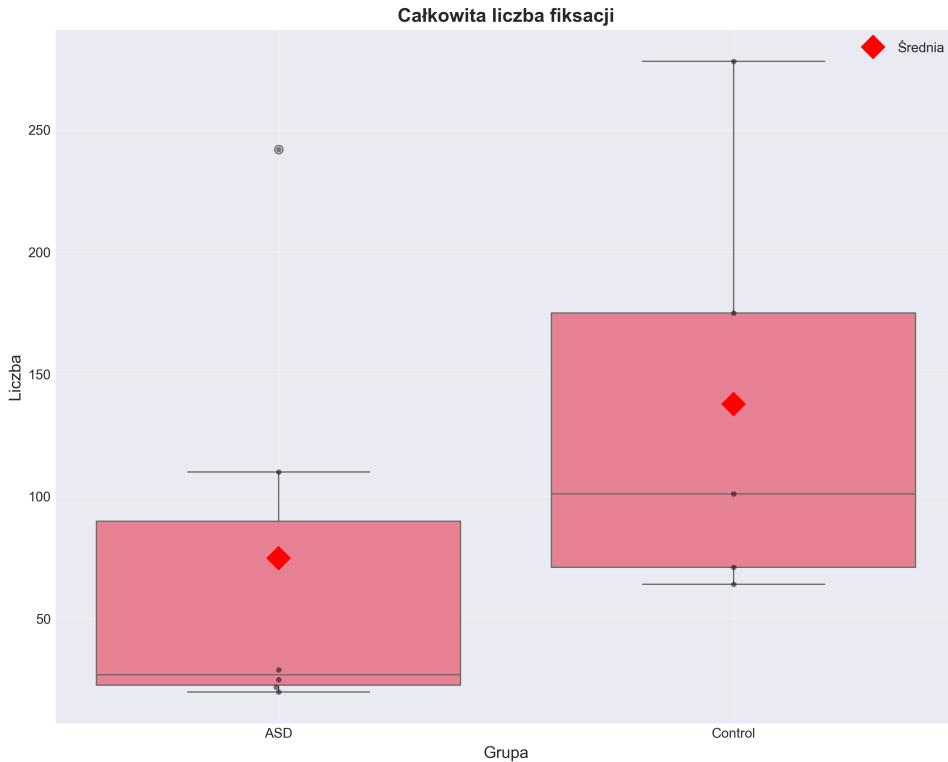
4.3.2 Fiksacje

Rysunek 4.2 prezentuje rozkład średniego czasu fiksacji. Uczestnicy z grupy ASD charakteryzują się krótszymi fiksacjami o stosunkowo niewielkim rozrzucie, poza pojedyńczym, odstającym wynikiem cechującym się znacznie przewyższającą wartością. Natomiast w grupie kontrolnej fiksacje są przeciętnie dłuższe, a rozkład bardziej rozciągnięty. Może to świadczyć o odmiennym stylu przetwarzania informacji wzrokowej, gdzie osoby z ASD częściej wykonują krótsze, skanujące fiksacje, podczas gdy osoby neurotypowe dłużej utrzymują spojrzenie na danym obszarze sceny.



Rysunek 4.2: Wykres rozkładu średniego czasu fiksacji

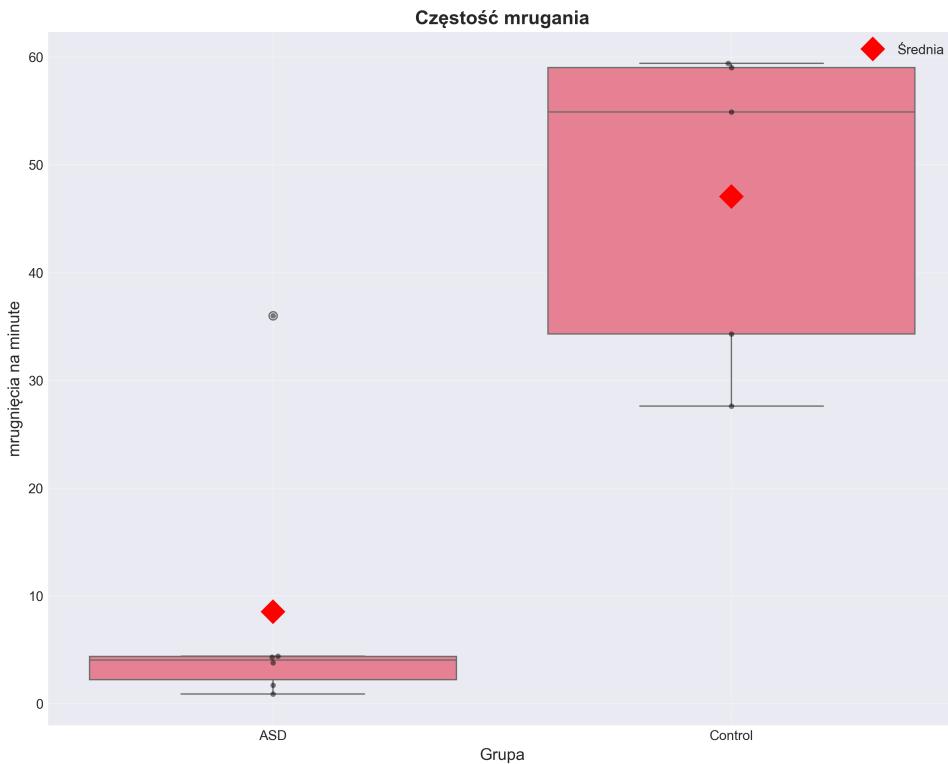
Na Rysunku 4.3 przedstawiono całkowitą liczbę fiksacji. W tym przypadku grupa kontrolna wykonuje wyraźnie więcej fiksacji w trakcie całego scenariusza, co sugeruje intensywniejsze eksplorowanie środowiska. W grupie ASD liczba fiksacji jest mniejsza, z pojedynczą wartością odstającą, które wskazują na zróżnicowanie stylu patrzenia w obrębie samej grupy. Razem oba wskaźniki sugerują, że osoby neurotypowe bardziej szczegółowo kontrolują przebieg transakcji, a osoby z ASD w większym stopniu polegają na krótkich, rzadszych próbkach informacji wzrokowej.



Rysunek 4.3: Wykres rozkładu liczby wszystkich fiksacji

4.3.3 Częstość mrugnięć

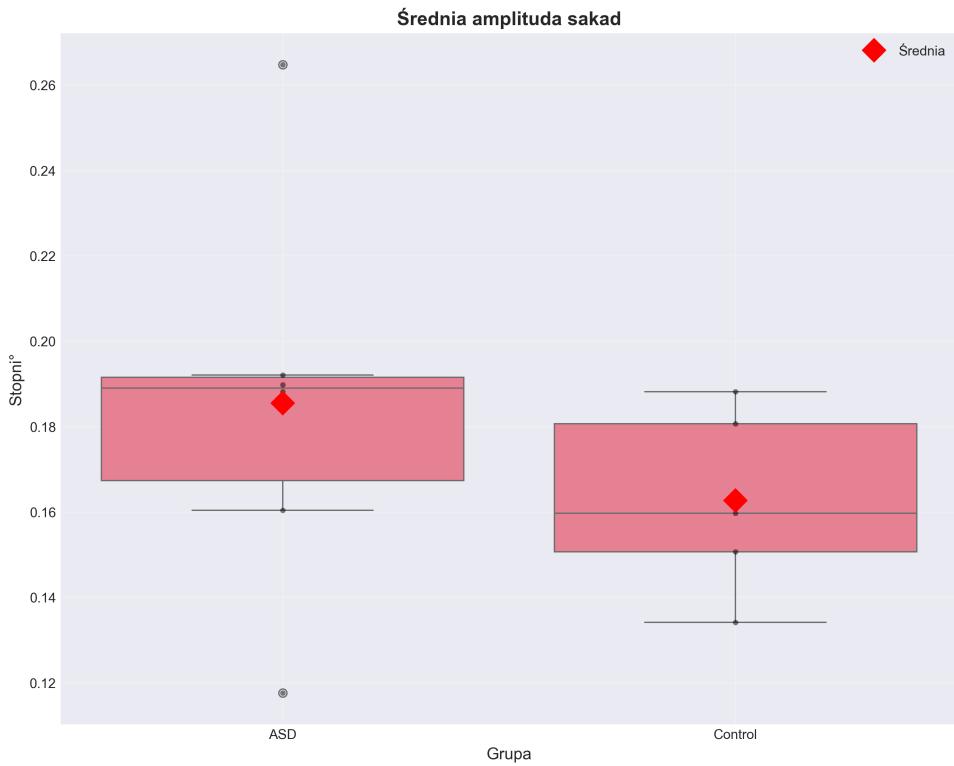
Rysunek 4.4 ilustruje rozkład częstości mrugnięć. Jest to jedna z najbardziej rozdzielających metryk. W grupie ASD wartości są bardzo niskie, rzędu kilku mrugnięć na minutę, z pojedynczym odstającym wyższym wynikiem, natomiast w grupie kontrolnej mruganie jest wielokrotnie częstsze, gdzie średnia 47 mrugnięć na minutę. Tak silne rozdzielenie grup sugeruje, że częstość mrugania może być bardzo czułym wskaźnikiem różnic w regulacji uwagi i pobudzenia w trakcie interakcji społecznej.



Rysunek 4.4: Wykres rozkładu częstości mrugnięć

4.3.4 Średnia applitudura sakkad

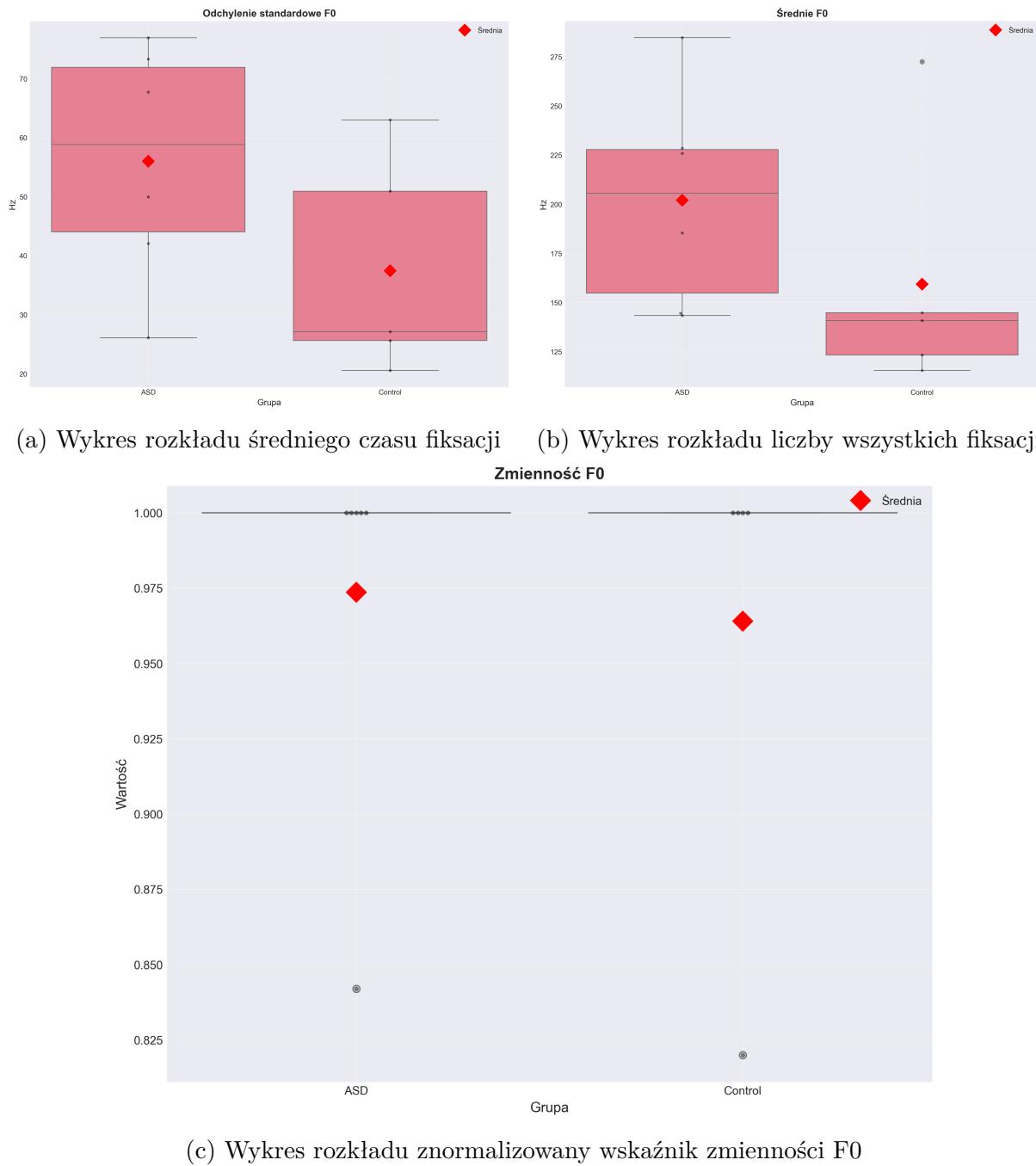
Na Rysunku 4.5 przedstawiono rozkład średniej amplitudu sakkady. Różnice między grupami są umiarkowane. Osoby z grupy ASD wykazują nieco większą średnią amplitudę sakkad, co może odzwierciedlać bardziej skokowe przenoszenie uwagi pomiędzy odległymi elementami sceny. Grupa kontrolna charakteryzuje się nieco mniejszą amplitudą przy podobnym rozrzucie wartości. W porównaniu z częstością mrugania i średnim czasem fiksacji różnice w amplitudzie sakkad są jednak mniej wyraźne i raczej uzupełniają ogólny obraz strategii patrzenia.



Rysunek 4.5: Wykres rozkładu średniej amplitud sakkad

4.3.5 Częstotliwość podstawowa

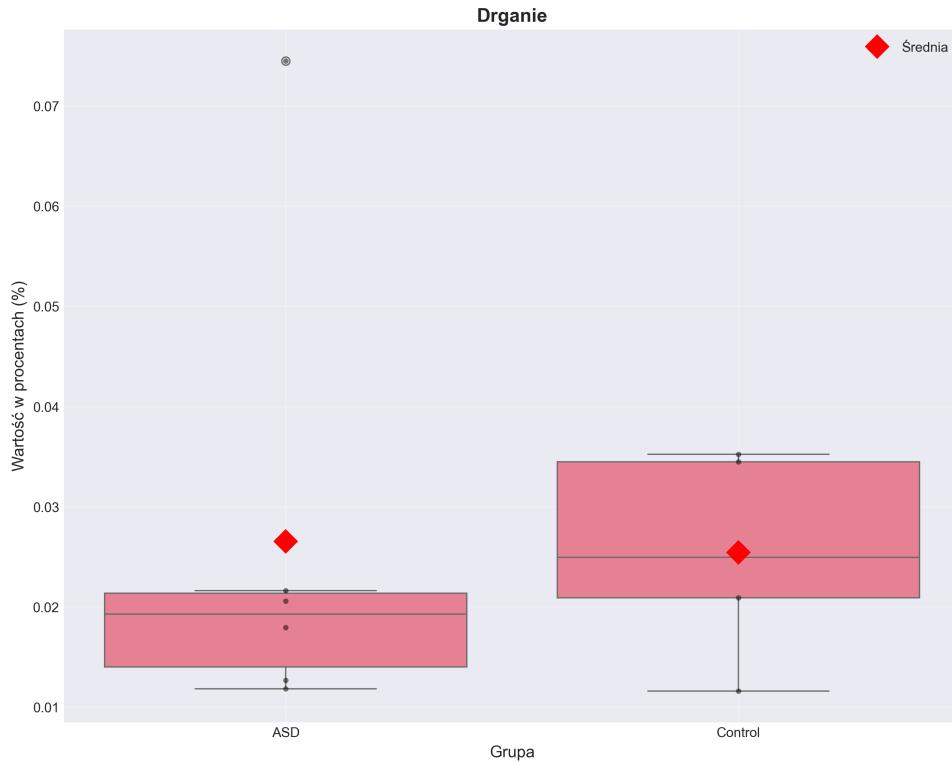
Rysunki 4.6a, 4.6b oraz 4.6c przedstawiają parametry związane z częstotliwością podstawową głosu F0. Na Rysunku 4.6b pokazano rozkład średniego F0. Osoby z grupy ASD mówią przeciętnie z wyższą częstotliwością podstawową niż uczestnicy z grupy kontrolnej, a rozrzut wartości w tej grupie jest większy. Może to wskazywać na częstsze podwyższanie tonu w sytuacji stresującej dla niektórych osób w spektrum autyzmu. Rysunek 4.6a obrazuje odchylenie standardowe F0, czyli zmienność wysokości głosu. W grupie ASD jest ono wyraźnie większe, co sugeruje bardziej zróżnicowaną intonację wypowiedzi. Uczestnicy z grupy kontrolnej wykazują niższą i bardziej jednorodną zmienność. Wzorzec ten wskazuje, że w analizowanej próbie osoby z ASD częściej posługują się skokową intonacją niż mową monotoniczną. Z kolei Rysunek 4.6c pokazuje zmienność częstotliwości podstawowej F0. Większość wyników w obu grupach znajduje się blisko górnej granicy skali, a różnice pomiędzy grupami są minimalne, co może świadczyć o efekcie sufitu. Prawdopodobnie zastosowanie jednostki sematonów zamiast herców mogło wpłynąć na taki wynik tej metryki. W praktyce oznacza to, że bardziej informacyjne okazują się surowe parametry średniego F0 i jego odchylenia standardowego niż sam wskaźnik znormalizowany.



Rysunek 4.6: Wykresy dotyczące częstotliwości podstawowej

4.3.6 Drganie

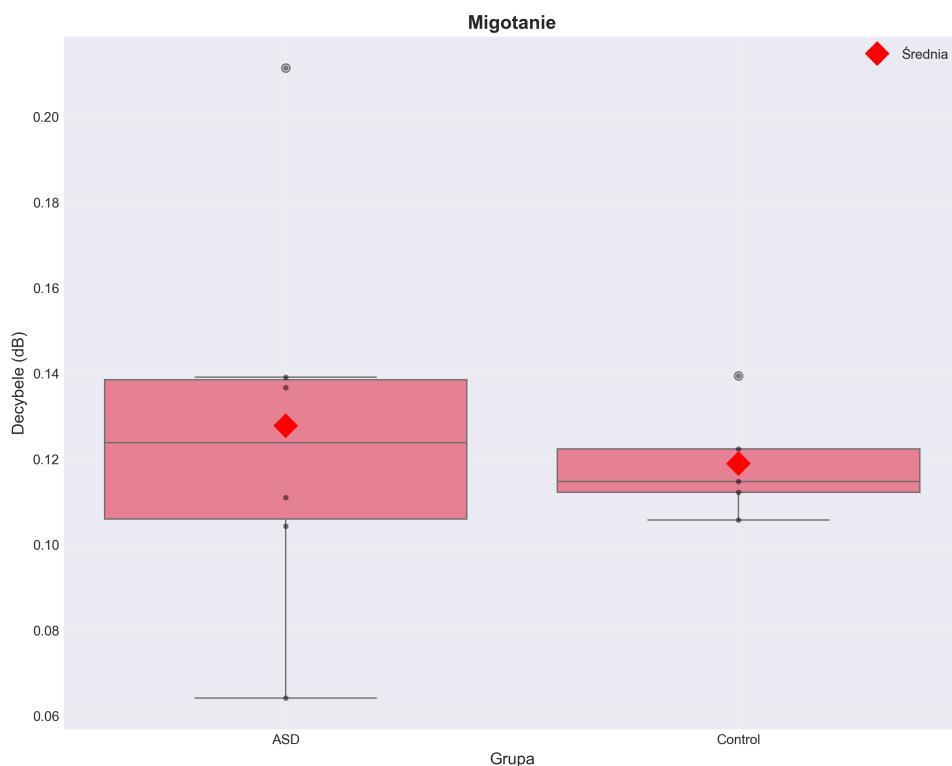
Rysunek 4.7 przedstawia rozkład drgań, czyli krótkookresowych wahań częstotliwości podstawowej. Różnice pomiędzy grupami są relatywnie niewielkie, a rozkłady w dużej mierze na siebie nachodzą. W grupie ASD widoczna jest pojedyncza wartość odstająca o podwyższonym drganiu, co może wskazywać na indywidualne zaburzenia stabilności tonu, jednak nie jest to efekt systematyczny. Parametr drgania pełni zatem w tym badaniu raczej rolę uzupełniającą wobec pozostałych wskaźników głosu.



Rysunek 4.7: Wykres rozkładu drgania

4.3.7 Migotanie

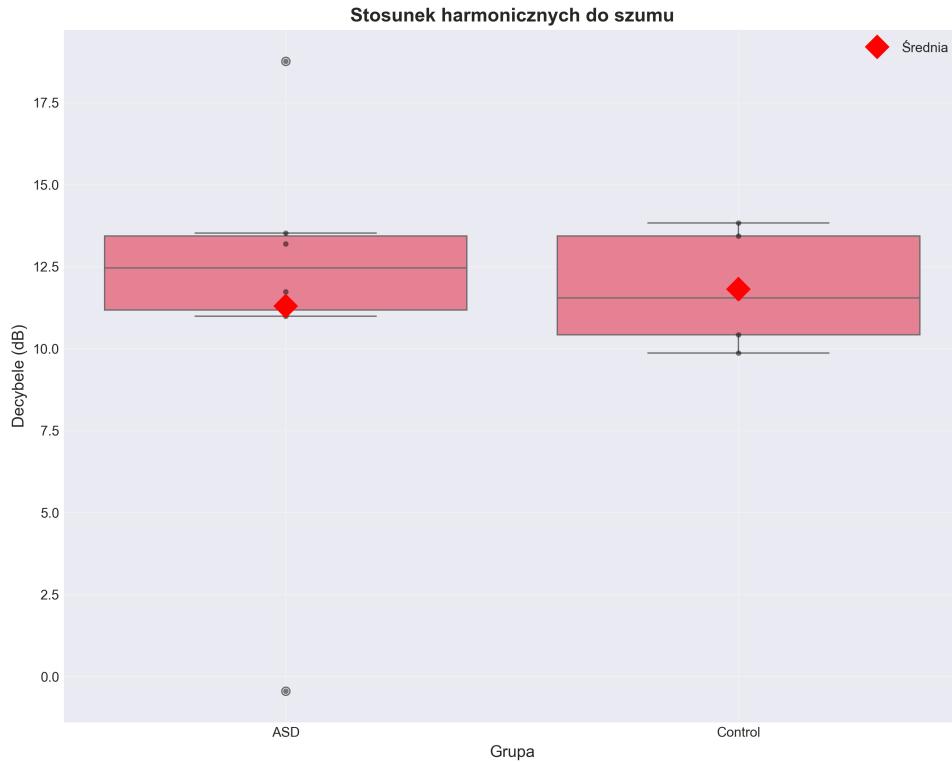
Na Rysunku 4.8 pokazano rozkład migotania, czyli wahania amplitudy głosu. Średnia wartość migotania jest nieco wyższa w grupie ASD, a rozrzut wyników większy, z pojedynczymi wartościami odstającymi. W grupie kontrolnej wartości są bardziej skupione i niższe. Zwiększone migotanie oznacza mniejszą stabilność amplitudy głosu i może odpowiadać bardziej nieregularnemu, nerwowemu brzmieniu mowy u niektórych osób z ASD, szczególnie w momentach krytycznych scenariusza.



Rysunek 4.8: Wykres rozkładu migotania

4.3.8 Stosunek harmoniczny do szumu

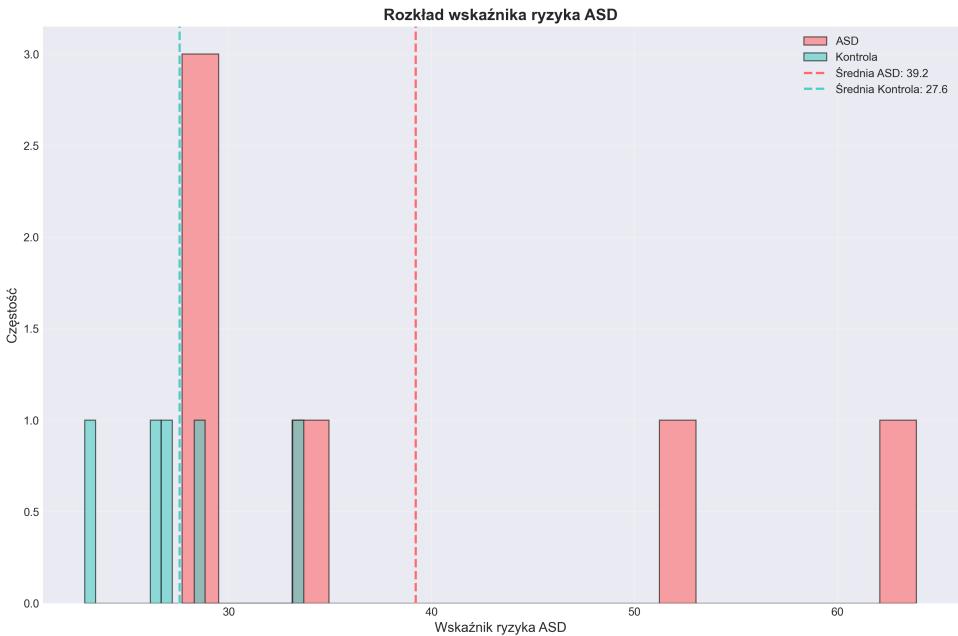
Rysunek 4.9 przedstawia rozkład stosunku harmonicznych do szumu. Obie grupy wy- padają tutaj stosunkowo podobnie, z lekką tendencją do nieco wyższych wartości w grupie kontrolnej, co może wskazywać na lepszą jakość głosu. W grupie ASD pojawia się poje- dyncza, bardzo niska wartość, sugerująca silnie zaszumiony sygnał, jednak nie jest to efekt typowy dla całej grupy. Ogólnie metryka nie wydaje się parametrem silnie różnicującym grupy, ale wraz z drganiem i migotaniem współtworzy profil jakości akustycznej mowy.



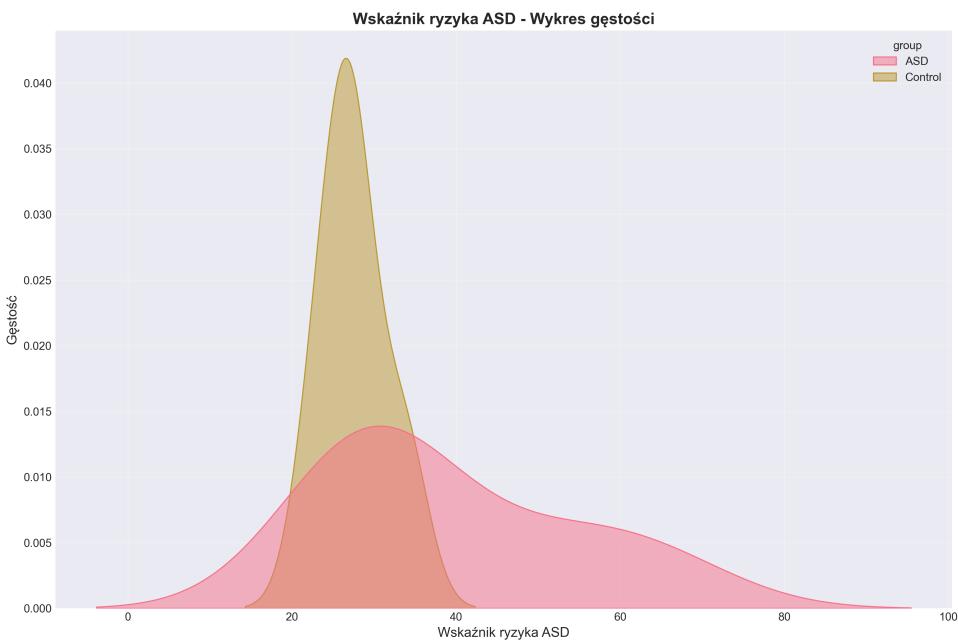
Rysunek 4.9: Wykres rozkładu stosunku harmonicznego do szumu

4.3.9 Ocena ryzyka ASD

Na Rysunku 4.10 przedstawiono histogram rozkładu złożonej oceny ryzyka ASD, a na Rysunku 4.11 odpowiadający mu wykres gęstości. Wartości w grupie kontrolnej koncentrują się w niższym zakresie, w okolicach 25-30 punktów, natomiast w grupie ASD, oprócz podobnych wartości, pojawiają się także wyniki znacznie wyższe, powyżej 50 i 60 punktów. Średnia grupy ASD jest zdecydowanie wyższa niż średnia grupy kontrolnej, co potwierdza ogólną skuteczność wskaźnika w różnicowaniu badanych. Jednocześnie, w przedziale około 28-35 punktów, rozkłady obu grup nakładają się na siebie, tworząc niejednoznaczny obszar. Uzasadnia to potrzebę dopracowania wskaźnika ryzyka dokładniejszymi wartościami progów i wag poszczególnych miar w celu lepszej weryfikacji.



Rysunek 4.10: Wykres rozkładu oceny ryzyka ASD



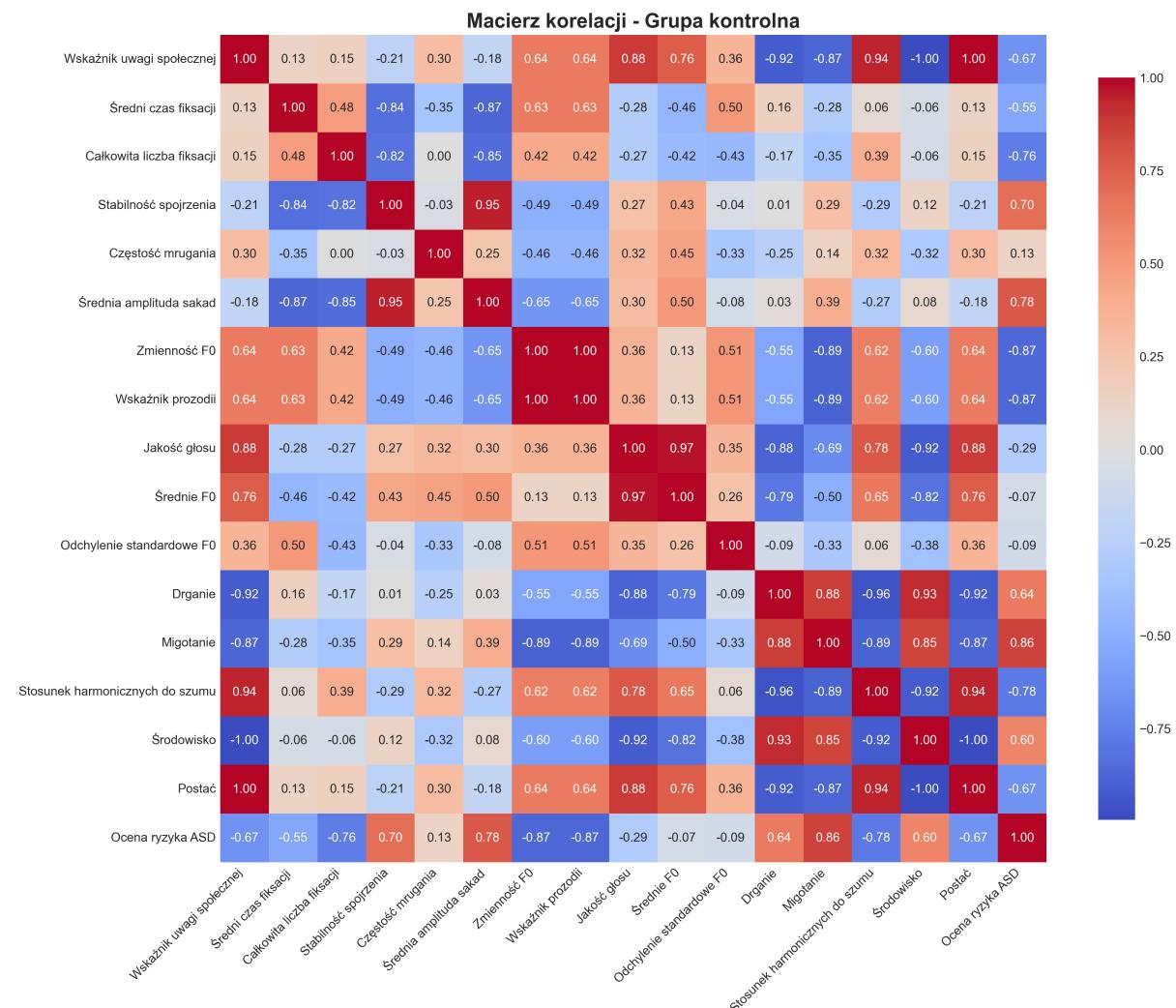
Rysunek 4.11: Wykres gęstości oceny ryzyka ASD

4.3.10 Korelacja między metrykami

Grupa kontrolna

Macierz korelacji dla grupy kontrolnej przedstawionej na Rysunku 4.12 pokazuje, że ocena ryzyka ASD jest najsilniej powiązana z metrykami opisującymi wzorce patrzenia oraz zmienność głosu. W szczególności wyższa ocena ryzyka wiąże się z mniejszą całkowitą liczbą fiksacji, większą średnią amplitudą sakkad oraz bardziej ustabilizowanym, rzadziej

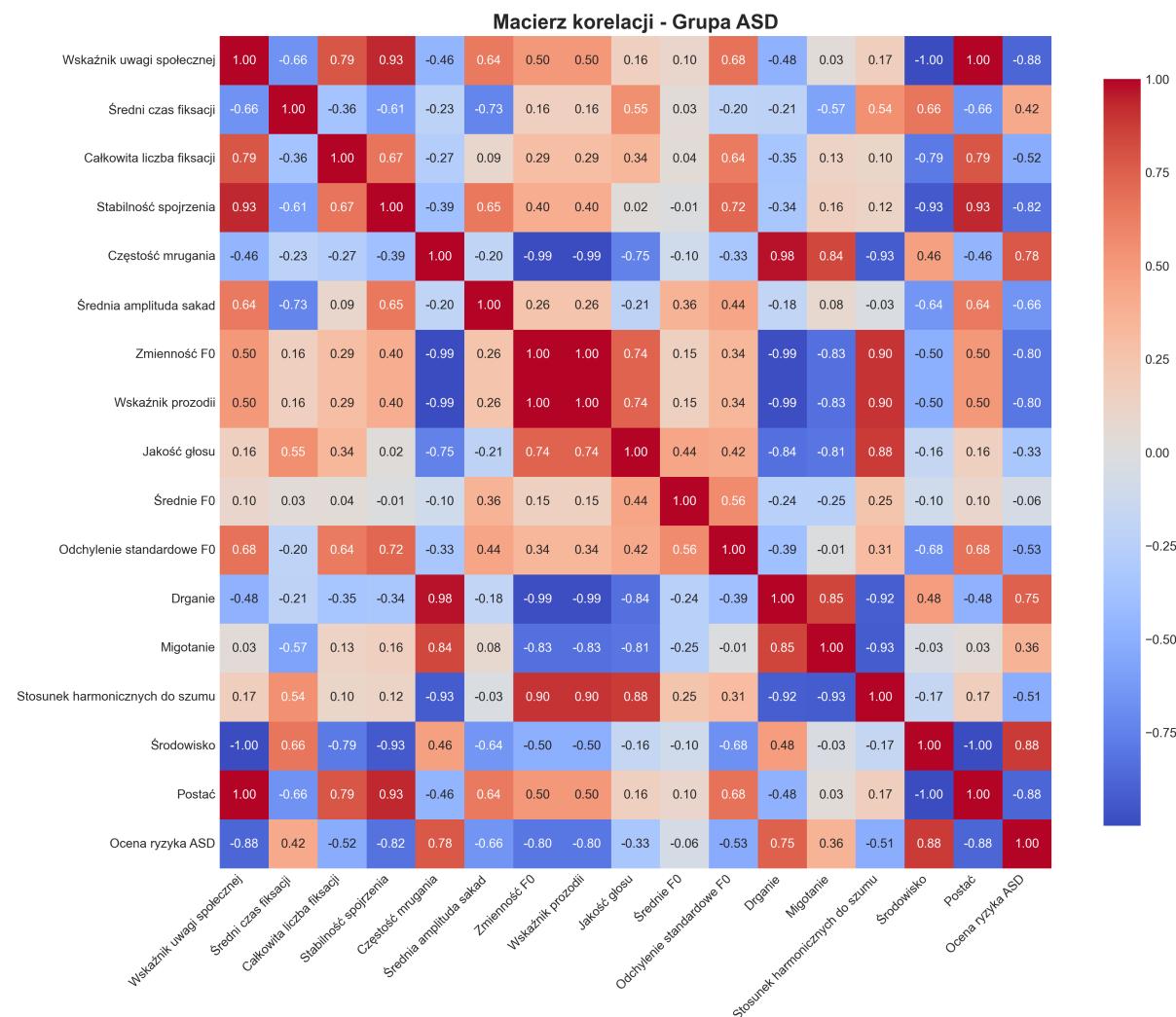
zmiennającym się spojrzeniem. Po stronie akustycznej wyższy wynik ryzyka to mniejsza zmienność F0 i prozodii oraz pogorszone drganie i migotanie. Poza zależnościami z samą oceną ryzyka ASD, macierz ujawnia kilka dodatkowych, interesujących powiązań pomiędzy metrykami. Wskaźnik uwagi społecznej jest dodatnio skorelowany ze zmiennością F0 oraz z wskaźnikiem prozodii, co sugeruje, że uczestnicy, którzy więcej czasu poświęcają na patrzenie na ekspedientkę, używają również bogatszej intonacji. Jednocześnie wyższa uwaga społeczna wiąże się z mniejszym drganiem, migotaniem oraz lepszym stosunkiem harmonicznych do szumu, co można interpretować jako bardziej skoncentrowaną i akustycznie lepszą wymianę verbalną. Silne korelacje występują także pomiędzy średnim czasem fiksacji, liczbą fiksacji a amplitudą sakkad. Dłuższe fiksacje towarzyszą mniejszej liczbie fiksacji oraz krótszym sakkadą, co wskazuje na spójny wzorzec bardziej stabilnego, lokalnego oglądu sceny.



Rysunek 4.12: Macierz korelacji metryk grupy kontrolnej

Grupa ASD

Macierz korelacji dla grupy ASD przedstawionej na Rysunku 4.13 ujawnia nieco inny profil zależności. W tej grupie ocena ryzyka ASD jest szczególnie silnie związana z uwagą społeczną oraz stabilnością spojrzenia. Im mniejsza proporcja czasu patrzenia na bodźce społeczne, a im bardziej skupione spojrzenie, tym wyższy wynik oceny ryzyka. Istotne są także częstsze mrugnięcia oraz większe nieregularności w głosie, czyli zwiększone drgania, migotania oraz zmniejszona zmienność F0 i prozodii.



Rysunek 4.13: Macierz korelacji metryk grupy ASD

Równie interesujące są jednak powiązania pomiędzy samymi metrykami. Wskaźnik uwagi społecznej jest bardzo silnie dodatnio skorelowany ze stabilnością spojrzenia oraz oceną postaci, co sugeruje, że uczestnicy, którzy bardziej pozytywnie oceniają eksperientkę, częściej i dłużej na nią patrzą, a ich spojrzenie jest stabilniejsze. Wysoka uwaga społeczna współwystępuje też z większą liczbą fiksacji i mniejszą częstością mrugania, co można interpretować jako bardziej zaangażowane wzrokowo uczestnictwo w scenariuszu. Parametry głosu w grupie ASD tworzą wyraźne klastry, których wskaźnik prozodii

i jakość głosu są ze sobą dodatnio powiązane, gdzie korzystają z blisko powiązanych ze sobą metryk. Ciekawą zależnością jest też silne powiązanie drgań i migotania z częstością mrugania oraz liczbą fiksacji, ponieważ osoby, które wykonują mniej mrugnięć i rzadziej zmieniają punkt fiksacji, częściej charakteryzują się większą stabilnością głosu. Za najlepsze wskaźniki różnicujące poziom ryzyka wewnątrz grupy ASD można uznać wskaźnik uwagi społecznej, stabilność spojrzenia, częstość mrugania oraz wskaźnik prozodii. Do najsłabszych korelatów wskaźnika ryzyka należą natomiast średnie F0, ogólny wskaźnik jakości głosu oraz w mniejszym stopniu stosunek harmoniczny do szumu, co oznacza, że te parametry opisują raczej indywidualne różnice w głosie niż nasilenie cech ze spektrum autyzmu.

4.4 Podsumowanie wyników

Przeprowadzone badania pokazały, że zaprojektowane środowisko symulacyjne jest w stanie wywołać złożoną, choć krótką interakcję społeczną, w której da się wiarygodnie rejestrować zarówno dynamikę spojrzeń, jak i parametry mowy. Pomimo niewielkiej liczebności próby uzyskano szereg spójnych różnic pomiędzy uczestnikami ze spektrum autyzmu a osobami neurotypowymi, co wskazuje na potencjał wykorzystania takiego środowiska jako narzędzia wspomagającego diagnostykę ASD.

Po stronie zachowań wzrokowych najważniejsze różnice zaobserwowano w zakresie wskaźnika uwagi społecznej, średniego czasu fiksacji oraz całkowitej liczby fiksacji, a także częstości mrugania. Osoby z ASD rzadziej kierowały spojrzenie na bodźce społeczne, częściej stosowały krótsze, skanujące fiksacje i wykonywały mniej fiksacji ogółem. W grupie kontrolnej spojrzenie było bardziej stabilne i częściej skupione na ekspedientce oraz istotnych elementach sceny, co odzwierciedlało większe zaangażowanie w interakcję i lepsze monitorowanie przebiegu transakcji. Częstość mrugania okazała się jedną z najbardziej rozdzielających metryk, wskazując na różnice w regulacji uwagi i pobudzenia między grupami.

W sferze mowy szczególnie informatywne okazały się parametry związane z częstotliwością podstawową. Uczestnicy z ASD mówili przeciętnie z wyższą częstotliwością podstawową i wykazywali większą zmienność F0, co można interpretować jako bardziej zróżnicowaną mowę w sytuacji społecznej. Dodatkowo w tej grupie częściej obserwowano nieregularności sygnału, choć nie była to cecha jednolita dla wszystkich badanych.

Złożony wskaźnik oceny ryzyka ASD zasadniczo odróżniał osoby z ASD od grupy kontrolnej; jednak w środkowym zakresie wartości rozkładu obu grup nachodziły na siebie i utrudniało ich jednoznaczne rozróżnienie. Analiza macierzy korelacji pokazała, że to właśnie połączenie wskaźnika ryzyka z metrykami okulograficznymi i akustycznymi daje najlepiejający obraz funkcjonowania uczestników.

Rozdział 5

Podsumowanie

Celem niniejszej pracy było zaprojektowanie, implementacja oraz wstępna ewaluacja prototypowego środowiska symulacyjnego interakcji społecznych, które mogłyby w przyszłości stanowić element systemu wspomagającego diagnostykę zaburzeń ze spektrum autyzmu (ASD). Rozwiązanie to miało odpowiadać na praktyczny problem braku narzędzi łączących realistyczne, kontrolowane scenariusze społeczne z obiektywnym pomiarem zachowań uczestnika w sposób powtarzalny i możliwy do dalszej automatyzacji.

W toku pracy zrealizowano, zaprojektowano i zaimplementowano prototyp środowiska badawczego opartego na silniku Unity, integrującego scenariusz interakcji z wirtualną ekspedientką kina, system śledzenia wzroku oraz zewnętrzny program Praat do analizy mowy. Opracowano scenariusz eksperymentalny oraz protokół badania, umożliwiający przebieg interakcji społecznej. Jednocześnie zdefiniowano zestaw metryk okulograficznych i akustycznych oraz przeprowadzono pilotowe badanie z udziałem osób w spektrum autyzmu oraz osób neurotypowych, co umożliwiło wstępne porównanie obu grup oraz analizę związków badanych parametrów z oceną ryzyka ASD.

Zaproponowane rozwiązanie opiera się na połączeniu realistycznego scenariusza, technicznej infrastruktury do jednoczesnej rejestracji wielu modalności oraz zestawu ilościowych wskaźników opisujących przebieg interakcji. Przeprowadzone badania pokazały, że środowisko generuje przewidywalne wzorce zachowań, w których wybrane metryki różnicują osoby z ASD od osób z grupy kontrolnej, a część z nich wykazuje istotne związki z wskaźnikiem ryzyka ASD.

Zaprezentowane rozwiązanie ma kilka istotnych mocnych stron. Rozwiązanie integruje wiele opcji pomiaru, co pozwala analizować interakcję społeczną w sposób bliższy rzeczywistym warunkom niż tradycyjne metody oparte jedynie na obserwacji lub kwestionariuszach. Stworzone oprogramowanie nie miało żadnych problemów z działaniem na poszczególnych stacjach roboczych. Stworzony eksperymentalny scenariusz jest kontrolowany, powtarzalny i intuicyjny dla uczestników, co ułatwia przeprowadzenie badania. Wykorzystane narzędzia techniczne umożliwiają prostą automatyzację analizy. W pracy zdefiniowano konkretny zestaw metryk, który może stanowić punkt odniesienia dla kolej-

nych badań i ułatwia porównywanie rezultatów między różnymi ośrodkami.

Jednocześnie należy jasno wskazać słabe strony i ograniczenia obecnego rozwiązania. Najpoważniejszym z nich jest mała liczebność próby, która uniemożliwia uogólnianie wyników na populację osób w spektrum autyzmu oraz ogranicza możliwość wykrycia subtelnego efektów statystycznych. Badanie opiera się na jednym, stosunkowo krótkim scenariuszu interakcji, więc nie wiadomo, na ile opisane wzorce zachowania są specyficzne dla sytuacji zakupu biletu w kinie, a na ile uogólniają się na inne konteksty społeczne. Niektóre rozwiązania rejestracji metryk nie sprawdziły tak, jak zakładano, takie jak zmienność częstotliwości liczonej w semitonach. Analiza danych nie jest powiązana z procesem podejmowania decyzji klinicznych, ponieważ nie uwzględnia formalnej oceny specjalistów diagnostycznych.

Pomimo tych ograniczeń, wyniki sugerują kilka ważnych wniosków praktycznych. Wskaźniki oparte na śledzeniu wzroku, takie jak uwaga społeczna, liczba i czas trwania fiksacji oraz częstość mrugnięć, mogą w przyszłości stanowić wartościowe uzupełnienie tradycyjnych narzędzi diagnostycznych ASD, zwłaszcza w kontekście obserwacji zachowania w zadaniach społecznych.

Na tej podstawie można sformułować kilka ogólnych rekomendacji dotyczących dalszego rozwoju opisanego rozwiązania. W pierwszej kolejności zasadne wydaje się rozszerzenie zestawu scenariuszy o inne typy interakcji, na przykład rozmowy z rówieśnikiem, sytuacje konfliktowe lub zadania wymagające współpracy, co pozwoli ocenić stabilność obserwowanych wzorców zachowania i zwiększyć trafność środowiska. Konieczne jest również zwiększenie liczebności i zróżnicowania próby badawczej, tak aby objąć osoby w różnym wieku, o odmiennym poziomie funkcjonowania i zróżnicowanym profilu klinicznym. Istotnym krokiem będzie także bliższa integracja środowiska z praktyką kliniczną, w tym współpraca ze specjalistami diagnozującymi ASD, co umożliwi powiązanie uzyskiwanych metryk z realnymi decyzjami diagnostycznymi. Można poszerzyć badania o inne rodzaje sprzętu, takie jak okulograf, google wirtualnej rzeczywistości czy zastosowanie technologii mieszanej rzeczywistości. W perspektywie technicznej można zastosować metody uczenia maszynowego do predykcji ryzyka ASD na podstawie wielu metryk jednocześnie.

Podsumowując, przedstawiona w pracy koncepcja środowiska symulacyjnego interakcji społecznych, wsparta danymi ze śledzenia wzroku i analizy mowy, okazała się technicznie wykonalna i obiecująca z punktu widzenia dalszych badań nad wspomaganiem diagnostyki ASD. Uzyskane rezultaty mają charakter wstępny, ale wyznaczają wyraźny kierunek rozwoju ku bardziej dojrzałemu narzędziu, które w przyszłości może stać się realnym wsparciem dla specjalistów zajmujących się diagnozą zaburzeń ze spektrum autyzmu.

Bibliografia

- [1] Seyedeh Zahra Asghari, Sajjad Farashi, Saeid Bashirian i Ensiyeh Jenabi. „Distinctive prosodic features of people with autism spectrum disorder: a systematic review and meta-analysis”. W: *Scientific Reports* 11.23093 (2021), s. 1–17.
- [2] American Psychiatric Association. *Diagnostic and statistical manual of mental disorders (5th ed.)* Washington, DC: American Psychiatric Association Publishing, 2013. ISBN: 978-0890425558.
- [3] audEERING. *openSMILE 3.0*. 2025. URL: <https://www.audeering.com/research/opensmile> (dostęp 24.08.2025).
- [4] S. Baron-Cohen, A. M. Leslie i U. Frith. „Does the Autistic Child have a “Theory of Mind”?” W: *Cognition* 21 (1985), s. 37–46.
- [5] Douglas Bates, Martin Mächler, Ben Bolker i Steve Walker. „Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4”. W: *Journal of Statistical Software* 67.1 (2015), s. 1–48.
- [6] Yoav Benjamini i Yosef Hochberg. „Controlling the False Discovery Rate: A Practical and Powerful Approach to Multiple Testing”. W: *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)* 57.1 (1995), s. 289–300.
- [7] Paul Boersma. „Accurate short-term analysis of the fundamental frequency and the harmonics-to-noise ratio of a sampled sound”. W: *Proceedings of the Institute of Phonetic Sciences*. T. 17. 1993, s. 97–110.
- [8] Paul Boersma i David Weenink. *Praat manual*. 2025. URL: <https://www.fon.hum.uva.nl/praat/manual/Manual.html> (dostęp 24.08.2025).
- [9] Paul Boersma i David Weenink. *Praat: doing phonetics by computer*. 2025. URL: <https://www.fon.hum.uva.nl/praat> (dostęp 24.08.2025).
- [10] Daniel Bone, Theodora Chaspari, Matthew S. Goodwin i Shrikanth Narayanan. „Automatic classification of children’s conversational states using prosodic and linguistic features: Potential for autism spectrum disorder risk assessment”. W: *Proceedings of Interspeech*. 2017, s. 3246–3250.

- [11] Daniel Bone, Chi-Chun Lee, Michael P. Black, Misha E. Williams, Sungbok Lee, Pat Levitt i Shrikanth Narayanan. „A processing pipeline for quantitative analysis of prosodic characteristics in child-directed speech: Applications for autism spectrum disorder”. W: *Speech Communication* 58 (2014), s. 305–320.
- [12] Z. Boraston i S.-J. Blakemore. „The application of eye-tracking technology in the study of autism”. W: *The Journal of Physiology (Review)* 581 (2007), s. 893–898.
- [13] Center for BrainHealth. *Charisma Virtual Social Coaching — avatar-driven social coaching*. URL: <https://centerforbrainhealth.org/charisma>.
- [14] Tânia Carneiro, António Carvalho, Sónia Frota i Marisa G. Filipe. „Serious Games for Developing Social Skills in Children and Adolescents with Autism Spectrum Disorder: A Systematic Review”. W: *Healthcare* 12.508 (2024), s. 1–16.
- [15] C. Chevallier, G. Kohls, V. Troiani, E. S. Brodkin i R. T. Schultz. „The social motivation theory of autism”. W: *Trends in Cognitive Sciences* 16.4 (2012), s. 231–239.
- [16] C. Chevallier, J. Parish-Morris, A. McVey, K. M. Rump, N. J. Sasson, J. D. Herrington i R. T. Schultz. „Measuring social attention and motivation in autism spectrum disorder using eye-tracking: Stimulus type matters”. W: *Autism Research* 8.5 (2015), s. 620–628.
- [17] John N. Constantino i Christian P. Gruber. *Social Responsiveness Scale, Second Edition (SRS-2)*. Los Angeles: Western Psychological Services, 2012. ISBN: 0749167432.
- [18] creativeIKEP. *Holistic Barracuda repository*. 2021. URL: <https://github.com/creativeIKEP/HolisticBarracuda> (dostęp 18.10.2025).
- [19] Lucia D’Alatri, Fabio Bussu i Enrico Scarano. „Objective voice analysis: Multi-center study of the Italian Society of Phoniatrics and Laryngology (SIFEL)”. W: *Acta Otorhinolaryngologica Italica* 34.2 (2014), s. 97–105.
- [20] Emilie Delaherche, Mohamed Chetouani, Abdelkader Mahdhaoui, Catherine Saint-Georges, Sylvie Viaux i David Cohen. „Interpersonal synchrony: A survey of evaluation methods across disciplines”. W: *IEEE Transactions on Affective Computing* 3.3 (2012), s. 349–365.
- [21] Michael J. Doughty i Taher Naase. „Further analysis of the human spontaneous eye blink rate by a cluster analysis-based approach to categorize individuals with ‘normal’ versus ‘frequent’ eye blink activity”. W: *Eye & Contact Lens* 32.6 (2006), s. 294–299.
- [22] The Social Express. *The Social Express - social learning software*.

- [23] Florian Eyben, Martin Wöllmer i Björn Schuller. „openSMILE – The Munich Versatile and Fast Open-Source Audio Feature Extractor”. W: *MM'10 - Proceedings of the ACM Multimedia 2010 International Conference*. 2010, s. 1459–1462.
- [24] A. Frolli, G. Savarese, F. Di Carmine, A. Bosco, E. Saviano, A. Rega, M. Carotenuto i M.C. Ricci. „Children on the Autism Spectrum and the Use of Virtual Reality for Supporting Social Skills”. W: *Children* 9 (2022), s. 181.
- [25] M. Frost-Karlsson, M. A. Galazka, C. Gillberg, C. Miniscalco, E. Billstedt i J. Åsberg Johnels. „Social scene perception in autism spectrum disorder: An eye-tracking and pupillometric study”. W: *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology* 41.10 (2019), s. 1024–1032.
- [26] S. Gabrielli, M. Cristofolini, M. Dianti, G. Alvari, E. Vallefuoco, A. Bentenuto, P. Venuti, O. Mayora Ibarra i E. Salvadori. „Co-Design of a Virtual Reality Multiplayer Adventure Game for Adolescents With Autism Spectrum Disorder: Mixed Methods Study”. W: *JMIR Serious Games* 11 (2023), e51719.
- [27] Mary Hanley, Debbie Riby, Clare Carty, Annie Melaugh McAteer, Andrew Kennedy i Martin McPhillips. „The use of eye-tracking to explore social difficulties in cognitively able students with autism spectrum disorder: A pilot investigation”. W: *Autism* 19.10 (2015), s. 868–873.
- [28] Kenneth Holmqvist, Marcus Nyström, Richard Andersson, Richard Dewhurst, Halszka Jarodzka i Joost van de Weijer. *Eye Tracking: A Comprehensive Guide to Methods and Measures*. Oxford: Oxford University Press, 2011. ISBN: 978-0-19969708-3.
- [29] Kenneth Holmqvist, Saga Lee Örbom, Ignace T. C. Hooge, Diederick C. Niehorster, Robert G. Alexander, Richard Andersson, Jeroen S. Benjamins, Pieter Blignaut, Anne-Marie Brouwer, Lewis L. Chuang, Kirsten A. Dalrymple, Denis Drieghe, Matt J. Dunn, Ulrich Ettinger, Susann Fiedler, Tom Foulsham, Jos N. van der Geest, Dan Witzner Hansen, Samuel B. Hutton, Enkelejda Kasneci i in. „Eye tracking: empirical foundations for a minimal reporting guideline”. W: *Behavior Research Methods* 55.1 (2023), s. 364–416.
- [30] Laura Hull, William Mandy, Meng-Chuan Lai, Simon Baron-Cohen, Carrie Allison, Paula Smith i Konstantinos V. Petrides. „Putting on My Best Normal: Social Camouflaging in Adults with Autism Spectrum Conditions”. W: *Journal of Autism and Developmental Disorders* 47.8 (2017), s. 2519–2534.
- [31] W. Jones i A. Klin. „Attention to eyes is present but in decline in 2–6-month-old infants later diagnosed with autism”. W: *Nature* 504 (2013), s. 427–431.
- [32] Model Me Kids. *Model Me Interactive — video modeling for social skills*. URL: <https://www.modelmekids.com/software-for-autism/>.

- [33] Ami Klin, Warren Jones, Robert Schultz i Fred Volkmar. „Visual fixation patterns during viewing of naturalistic social situations as predictors of social competence in individuals with autism”. W: *Archives of General Psychiatry* 59.9 (2002), s. 809–816.
- [34] P. Kourtesis, E.-C. Kouklari, P. Roussos, V. Mantas, K. Papanikolaou, C. Skaloumbakas i A. Pehlivanidis. „Virtual Reality Training of Social Skills in Adults with Autism Spectrum Disorder: An Examination of Acceptability, Usability, User Experience, Social Skills, and Executive Functions”. W: *Behavioral Sciences* 13 (2023), s. 336.
- [35] U. Lahiri, A. Trewyn, Z. Warren i N. Sarkar. „Dynamic Eye Gaze and its Potential in Virtual Reality Based Applications for Children with Autism Spectrum Disorders”. W: *Autism Research and Treatment* 2011 (2011), Article ID 101 (or see journal record).
- [36] M. Leharanger, E. A. Rodriguez Martinez, O. Balédent i L. Vandromme. „Familiarization with Mixed Reality for Individuals with Autism Spectrum Disorder: An Eye Tracking Study”. W: *Sensors* 23.14 (2023), s. 6304.
- [37] *Let's Face It! (LFI!) - training and assessment program (overview)*. URL: <https://asdtechnology.osot.ubc.ca/lfi/> (dostęp 18.08.2025).
- [38] Choon Guan Lin Xiangting Bernice Lim i Tih-Shih Lee. „Social Deficits or Interactional Differences? Interrogating Perspectives on Social Functioning in Autism”. W: *Frontiers in Psychiatry* 13.78 (2022), s. 431–433.
- [39] Catherine Lord, Michael Rutter, Pamela C. DiLavore, Susan Risi, Katherine Gotham i Somer L. Bishop. *Autism Diagnostic Observation Schedule, Second Edition (ADOS-2)*. Los Angeles: Western Psychological Services, 2012. ISBN: 978-0749164065.
- [40] T. Manju, S. Padmavathi Magesh i Durairaj. „Increasing the Social Interaction of Autism Child using Virtual Reality Intervention (VRI)”. W: *ACM Transactions on Asian and Low-Resource Language Information Processing* (2023).
- [41] Alberto Megías-Robles, María José Gutiérrez-Cobo, Rosario Cabello, Raquel Gómez-Leal, Simon Baron-Cohen i Pablo Fernández-Berrocal. „The ‘Reading the mind in the Eyes’ test and emotional intelligence”. W: *R. Soc. Open Sci.* 201305.7 (2020), s. 1–7.
- [42] Myra Miller, Ana-Maria Iosif, Michelle Hill, Gregory S. Young, Amy J. Schwichtenberg i Sally Ozonoff. „Diagnostic Assessment of Autism Spectrum Disorder: A Review of Current Practices”. W: *Child and Adolescent Psychiatric Clinics of North America* 28.3 (2019), s. 265–279.
- [43] Daniel Milton. *On the ontological status of autism: the 'double empathy problem'*. 2012.

- [44] Alysson Renato Muotri. „Autism spectrum disorders: Challenges and perspectives”. W: *Dev Neurobiol* 5.78 (2018), s. 431–433.
- [45] World Health Organization. *ICD-11 for mortality and morbidity statistics: 6A02 autism spectrum disorder*. 2022. URL: <https://icd.who.int/browse/2024-01/mms/en#437815624> (dostęp 14.08.2025).
- [46] E. Pellicano i D. Burr. „When the world becomes ‘too real’: a Bayesian explanation of autistic perception”. W: *Trends in Cognitive Sciences* 16.10 (2012), s. 504–510.
- [47] Sathiyaprakash Ramdoss, Wendy Machalicek, Mandy Rispoli, Austin Mulloy, Russell Lang i Mark O'Reilly. „Computer-based interventions to improve social and emotional skills in individuals with autism spectrum disorders: a systematic review”. W: *Developmental Neurorehabilitation* 15.2 (2012), s. 119–135.
- [48] Fabian Ramseyer i Wolfgang Tschacher. „Nonverbal synchrony in psychotherapy: Coordinated body movement reflects relationship quality and outcome”. W: *Journal of Consulting and Clinical Psychology* 79.3 (2011), s. 284–295.
- [49] Michael Rutter, Ann Le Couteur i Catherine Lord. *Autism Diagnostic Interview-Revised (ADI-R)*. Los Angeles: Western Psychological Services, 2003. ISBN: 978-0749140854.
- [50] Lawrence D. Shriberg, Rhea Paul, Jennifer L. McSweeny, Ami Klin, Donald J. Cohen i Fred R. Volkmar. „Prosodic speech characteristics of children with autism”. W: *Journal of Speech, Language, and Hearing Research* 44.5 (2011), s. 1097–1114.
- [51] Shu-Jou Sun, An-Chin Huang i Wei-Sho Ho. „Enhancing Social Skills in Autism Students with Augmented-Reality Picturebooks”. W: *Applied Sciences* 14.114907 (2024), s. 4907.
- [52] TeachTown. *TeachTown - social skills and educational software*. URL: <https://web.teachtown.com/solutions/teachtown-social-skills/>.
- [53] Unity Technology. *Unity*. 2025. URL: <https://unity.com> (dostęp 18.10.2025).
- [54] João Paulo Teixeira, Carla C. Oliveira i Carla Lopes. „Vocal Acoustic Analysis – Jitter, Shimmer and HNR Parameters”. W: *Procedia Technology* 9 (2013), s. 1112–1122.
- [55] Dominic A. Trevisan, Naomi Roberts, Catherine Lin i Elina Birmingham. „A meta-analysis on facial emotion recognition in autism spectrum disorder: The role of stimulus type and task demand”. W: *Journal of Autism and Developmental Disorders* 48.8 (2018), s. 2556–2571.
- [56] Lyn S. Turkstra, Angela M. Politis i Robyn Forsyth. „Pragmatic communication abilities in children and adults: Implications for assessment and intervention”. W: *Journal of Speech, Language, and Hearing Research* 58.5 (2015), s. 1781–1790.

- [57] *Using computerized games to teach face recognition skills to children with autism spectrum disorder: the Let's Face It! program (summary)*. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20646129/>.
- [58] Tobias Wagner i Mark Colley. *UnitEye repository*. 2024. URL: <https://github.com/wgnrto/uniteye/tree/main> (dostęp 18.10.2025).
- [59] Tobias Wagner, Mark Colley, Daniel Breckel, Michael Kösel i Enrico Rukzio. „UnitEye: Introducing a User-Friendly Plugin to Democratize Eye Tracking Technology in Unity Environments”. W: *Proceedings of Mensch Und Computer 2024*. 2024, s. 1–10.
- [60] Raymond Kong Wang, Kenneth Kwong, Kevin Liu i Xue-Jun Kong. „New eye tracking metrics system: the value in early diagnosis of autism spectrum disorder”. W: *Frontiers in Psychology* 15.1518180 (2024), s. 1–13.
- [61] C. Whalen, D. Moss, A.B. Ilan, M. Vaupel, P. Fielding, K. Macdonald, S. Cernich i J. Symon. „Efficacy of TeachTown: Basics computer-assisted intervention for the Intensive Comprehensive Autism Program in Los Angeles Unified School District”. W: *Developmental Neurorehabilitation* 14.2 (2011), s. 119–135.
- [62] Lonnie Zwaigenbaum, Margaret L. Bauman, Deborah Fein, Karen Pierce, Tobias Buie, Pamela A. Davis, Craig Newschaffer, Diana L. Robins, Amy Wetherby, Roula Choueiri, Connie Kasari, Wendy L. Stone, Nurit Yirmiya, Annette Estes, Robin L. Hansen, James C. McPartland, Marvin R. Natowicz, Alice Carter, Doreen Granpeesheh, Zoe Mailloux, Susanne Smith Roley, Samantha Wagner i Susan J. Spence. „Early Identification of Autism Spectrum Disorder: Recommendations for Practice and Research”. W: *Pediatrics* 136.S1 (2015), S10–S40.

Dodatki

Spis skrótów i symboli

ASD Zaburzenie ze spektrum autyzmu (ang. *Autism Spectrum Disorder*)

ADOS-2 Obserwacyjna skala diagnozy autyzmu, druga edycja (ang. *Autism Diagnostic Observation Schedule – Second Edition*).

ADI-R Wywiad diagnostyczny dotyczący autyzmu – wersja poprawiona (ang. *Autism Diagnostic Interview – Revised*).

AQ Kwestionariusz spektrum autyzmu (ang. *Autism Spectrum Quotient*).

SRS Skala reaktywności społecznej (ang. *Social Responsiveness Scale*).

DSM-5 Podręcznik diagnostyczny i statystyczny zaburzeń psychicznych, wydanie piąt, Piąte wydanie (ang. *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders, Fifth Edition*).

ICD-11 Międzynarodowa Klasyfikacja Chorób, Jedenasta rewizja (ang. *International Classification of Diseases, 11th Revision*).

VR Wirtualna Rzeczywistość (ang. *Virtual Reality*)

AR Rzeczywistość rozszerzona (ang. *Augmented Reality*)

AOI Obszar zainteresowania (ang. *Area of Interest*).

CSV Tekstowy format zapisu danych tabelarycznych (ang. *Comma-Separated Values*).

TOM Teoria umysłu (ang. *Theory of mind*)

WAV Format zapisu nieskompresowanego dźwięku (ang. *Waveform Audio File Format*).

F0 Częstotliwość podstawowa sygnału mowy.

Hz Herc, jednostka częstotliwości.

ms Milisekunda, jednostka czasu.

dB Decybel, logarytmiczna jednostka poziomu sygnału.

Lista dodatkowych plików, uzupełniających tekst pracy

W systemie do pracy dołączono dodatkowe pliki zawierające:

- link do repozytorium programu,
- link do programu,
- dane zebrane podczas przeprowadzonych badań.

Spis rysunków

2.1 Wygląd aplikacji TeachTown podczas użytkowania	20
2.2 Wygląd aplikacji The Social Express podczas użytkowania	20
2.3 Wygląd gier w aplikacji Let's Face It!	21
2.4 Wygląd aplikacji Model Me Interactive podczas użytkowania	21
2.5 Wygląd aplikacji Charisma podczas użytkowania	22
3.1 Wygląd aplikacji przed rozpoczęciem scenariusza	31
3.2 Wygląd aplikacji w trakcie kalibracji	31
3.3 Wygląd ekranu prowadzącego badanie	33
4.1 Wykres rozkładu wskaźnika uwagi społecznej	38
4.2 Wykres rozkładu średniego czasu fiksacji	39
4.3 Wykres rozkładu liczby wszystkich fiksacji	40
4.4 Wykres rozkładu częstości mrugnięć	41
4.5 Wykres rozkładu średniej ampliduty sakkad	42
4.6 Wykresy dotyczące częstotliwości podstawowej	43
4.7 Wykres rozkładu drgania	44
4.8 Wykres rozkładu migotania	45
4.9 Wykres rozkładu stosunku harmonicznego do szumu	46
4.10 Wykres rozkładu oceny ryzyka ASD	47
4.11 Wykres gęstości oceny ryzyka ASD	47
4.12 Macierz korelacji metryk grupy kontrolnej	48
4.13 Macierz korelacji metryk grupy ASD	49