Adrian Olszewski[1], mgr inż. Piotr Lichograj[2], Przemysław Olszewski[3]
Akademia Bialska im. Jana Pawła II, Biała Podlaska

https://doi.org/10.29316/9788368103281_6

WYZWANIA IMPLEMENTACJI INTERFEJSU UŻYTKOWNIKA W APLIKACJACH MR DO NAUKI JĘZYKÓW OBCYCH

CHALLENGES OF IMPLEMENTING A USER INTERFACE IN MR APPLICATIONS FOR FOREIGN LANGUAGE LEARNING

Streszczenie

Rozdział analizuje kluczowe wyzwania projektowe, ergonomiczne i technologiczne związane z implementacją interfejsów użytkownika (UI) w aplikacjach mieszanej rzeczywistości (MR) przeznaczonych do nauki języków obcych. Opracowanie łączy dane empiryczne z badania ankietowego przeprowadzonego na 41 respondentach z aktualnymi wynikami badań nad interakcją człowiek-komputer (HCI), percepcją przestrzeni 3D i skutecznością rzeczywistości rozszerzonej i mieszanej (XR) w edukacji językowej. W pracy przedstawiono szczegółowe omówienie problemów precyzji gestów, obciążenia poznawczego, płynności interakcji oraz komfortu użytkownika. Zaproponowano zestaw praktycznych wytycznych projektowych i metod ewaluacji zgodnych z zaleceniami ergonomii poznawczej oraz standardami IEEE w zakresie projektowania zorientowanego na człowieka (human-centered design).

Słowa kluczowe: rzeczywistość mieszana, interfejs użytkownika, ergonomia poznawcza, edukacja językowa

[1] student, e-mail: olszewski22900@stud.akademiabialska.pl
[2] https://orcid.org/0000-0002-1351-4874, e-mail: p.lichograj@dyd.akademiabialska.pl
[3] student, e-mail: olszewski18321@stud.akademiabialska.pl

Abstract

This chapter examines the key design, ergonomic, and technological challenges involved in implementing user interfaces (UI) for mixed reality (MR) applications aimed at supporting foreign language learning. The study integrates empirical data from a survey of 41 participants with current research on human-computer interaction (HCI), 3D spatial perception, and the pedagogical effectiveness of augmented and mixed reality (XR) in language education. The paper provides an in-depth analysis of gesture precision, cognitive load, interaction fluidity, and user comfort. Furthermore, it proposes a set of practical design guidelines and evaluation methods grounded in cognitive ergonomics and aligned with IEEE standards for human-centred design. These insights offer a foundation for developing more intuitive, effective, and user-friendly MR learning environments.

Keywords: mixed reality, user interface, cognitive ergonomics, language learning

Wstęp

Mieszana rzeczywistość (MR), stanowiąca integrację technologii rzeczywistości wirtualnej (VR) i rozszerzonej (AR), staje się obiecującym narzędziem w dydaktyce języków obcych. MR umożliwia symulowane sytuacje komunikacyjne, kontekstowe oznaczanie obiektów, immersyjne ćwiczenia fonetyczne oraz praktykę w środowiskach półrealistycznych (Radianti i in., 2020; Parong, Mayer, 2018). Badania wskazują, że immersyjność zwiększa motywację, a przestrzenne osadzenie materiału językowego sprzyja utrwalaniu słownictwa (Chen, 2022).

Jednocześnie efektywność tych rozwiązań zależy w znacznej mierze od jakości interfejsu użytkownika – jego intuicyjności, ergonomii, precyzji gestów i spójności modalnej.

Metaanalizy wskazują na pozytywny wpływ XR na uczenie się języków. Chen (2022) raportuje duży efekt (Hedges' $g = 0.825$), potwierdzony przez niezależne analizy dotyczące VR-assisted learning ($g = 0.662$ dla wyników językowych i $g = 0.57$ dla motywacji; B. Chen, 2022). Wang i in. (2020) odnotowali efekt $g = 0.832$ dla środowisk typu 3D virtual worlds, co potwierdza istotność immersji w nauce języków. Jednakże wyniki są heterogeniczne – szersze metaanalizy edukacyjne wskazują na mniejszą wartość efektu ($g \approx 0.38$; Coban i in., 2022). Zróżnicowanie to sugeruje, że kluczową rolę odgrywa jakość projektu interfejsu.

Ramy teoretyczne i powiązane prace

Projektowanie interfejsów użytkownika w środowiskach rzeczywistości mieszanej opiera się na kilku komplementarnych perspektywach teoretycznych obejmujących obciążenie poznawcze, ucieleśnione poznanie, ograniczenia percepcyjne, zasady interakcji HCI oraz wyniki badań empirycznych nad gestami, złożonością wizualną i skutecznością XR w edukacji językowej.

Obciążenie poznawcze i multimodalność

Zgodnie z teorią obciążenia poznawczego Swellera (1988), efektywność interfejsu MR zależy od kontroli obciążenia wewnętrznego, zewnętrznego oraz właściwe procesy poznawcze (germane load), wspierającego procesy uczenia. W środowiskach MR obciążenie zewnętrzne może wzrastać wskutek nadmiernej złożoności sceny, zasłaniania obiektów, skomplikowanych menu czy nieczytelnych etykiet, co potwierdzają analizy dotyczące wpływu złożoności wizualnej i obszaru pola widzenia na czas selekcji i orientację przestrzenną (Ragan i in., 2015; Shuai i in., 2023). Jednocześnie odpowiednio zaprojektowana multimodalność może wspierać uczenie, o ile modalności nie konkurują o te same zasoby poznawcze, zgodnie z zasadami przetwarzania multimedialnego opisanymi przez Mayera (2001). Oznacza to konieczność eliminowania sygnałów redundantnych i stosowania mikroinformacji zwrotnych.

Ucieleśnione poznanie i uczenie osadzone

Ucieleśnione podejście do poznania zakłada nierozerwalny związek percepcji, działania i procesów kognitywnych (Wilson, 2002). W kontekście nauki języków obcych oznacza to, że manipulacja obiektami 3D, ruch ciała oraz kontekstowe osadzanie słownictwa sprzyjają lepszemu kodowaniu i przypominaniu treści. Badania nad XR w edukacji językowej wskazują, że środowiska trójwymiarowe zwiększają motywację i wspierają transfer wiedzy (Chen, 2022; Wang i in., 2020; Panagiotidis, 2021). Jednocześnie literatura podkreśla, że podejścia oparte na działaniach motorycznych mogą generować dodatkowe obciążenie poznawcze, jeśli gesty wymagają wysokiej precyzji lub nie są jednoznacznie zinterpretowane pod względem możliwości działania, co wykazali Yu i Bowman (2018).

Percepcja przestrzenna i ograniczenia sensoryczne

Projektowanie MR musi uwzględniać ograniczenia percepcji wzrokowej, takie jak pole widzenia, stereopsja, ostrość obrazu oraz wrażliwość na zasłanianie obiektów. Ragan i in. (2015) wykazali, że redukcja pola widzenia (Field of View - FOV) oraz zwiększona złożoność wizualna pogarszają zdolność lokalizacji i zapamiętywania obiektów, co ma bezpośrednie implikacje dla zadań leksykalnych w MR. Z kolei Saredakis i in. (2020) wskazują, że niespójność wizualno-kinestetyczna oraz nadmierna dynamika ruchów kamery zwiększają ryzyko choroby symulatorowej (cybersickness), ograniczając akceptowalny czas trwania sesji edukacyjnych. Z praktycznego punktu widzenia wymaga to projektowania scen z wyraźnymi punktami odniesienia, stosowania narzędzi zarządzania zasłanianiem (np. panele kontrastowe, podświetlanie konturowe) oraz unikania manipulacji drobnymi obiektami w dalekim planie.

Zasady HCI w manipulacji i sterowaniu 3D

Klasyczne prawa HCI, takie jak prawo Fittsa (Fitts, 1954), są przydatne do modelowania czasu selekcji, lecz wymagają adaptacji do przestrzeni 3D, gdzie znaczenie mają także trajektorie ruchu i głębia. Steering Law (Accot, Zhai, 2002) wskazuje, że ścieżki prowadzące i ograniczenia przestrzenne determinują dokładność i szybkość manipulacji, co należy uwzględniać w projektowaniu „korytarzy ruchu" w MR. Taksonomie mapowań gestów podkreślają kompromis między naturalnością a precyzją – im bardziej ekspresyjne i otwarte mapowanie, tym trudniej o dokładną selekcję obiektów (Yu, Bowman, 2018). Wymusza to stosowanie mechanizmów kompensujących, takich jak filtracja drgań, predykcja trajektorii oraz tryby uproszczone przy niskiej jakości śledzenia.

Wyniki empiryczne: gesty, złożoność i skuteczność XR

Badania empiryczne wskazują trzy obszary szczególnie istotne dla projektowania UI:

- precyzja gestów – gesty naturalne zwiększają immersję, lecz są mniej precyzyjne niż interakcje pośrednie (Yu, Bowman, 2018). Oznacza to, że gesty sprawdzają się głównie w zadaniach komunikacyjnych, natomiast zadania testowe wymagają narzędzi precyzyjnych,
- złożoność wizualna – wysoki poziom detalu i zasłanianie obiektów wydłużają czas identyfikacji i podnoszą obciążenie poznawcze, co potwierdzają badania (Ragan i in., 2015; Shuai i in., 2023). Uproszczony rendering jest korzystniejszy w zadaniach leksykalnych,
- skuteczność XR w dydaktyce językowej – metaanalizy wykazują umiarkowane do dużych efekty przyrostu kompetencji językowych (Chen, 2022; Wang i in., 2020; B. Chen, 2022), choć ich wielkość zależy od jakości projektu dydaktycznego i interfejsu użytkownika, co pokazują także szerzej zakrojone analizy edukacyjne (Coban i in., 2022).

Modele integrujące – CAMIL i projektowanie oparte na dowodach

Model CAMIL (Makransky, Petersen, 2021) integruje wcześniej opisane perspektywy, wskazując, że efektywność uczenia w technologiach immersyjnych wynika z interakcji między kontrolą poznawczą, afektem i poczuciem immersji. Zgodnie z tym podejściem interfejs MR powinien minimalizować obciążenie zewnętrzne i wzmacniać procesy sprzyjające uczeniu poprzez adaptację poziomu szczegółowości, rodzaju interakcji oraz intensywności informacji zwrotnej. Kluczowe znacznie ma także monitorowanie metryk technicznych, takich jak FPS, opóźnienia czy błędy śledzenia, co umożliwia projektowanie oparte na dowodach i pozwala identyfikować czynniki moderujące efektywność uczenia się (Slater, Wilbur, 1997).

Metodyka badań własnych

Celem badania było zidentyfikowanie kluczowych problemów projektowych i ergonomicznych w interfejsach MR wykorzystywanych w nauce języków obcych oraz ocena intuicyjności, precyzji, komfortu i użyteczności aplikacji edukacyjnej.

W ramach przygotowania środowiska badawczego opracowano prototypowy symulator poruszania się w przestrzeni rzeczywistości mieszanej (MR), przedstawiający wnętrze domu jednorodzinnego z podziałem na odrębne pomieszczenia pełniące funkcję scen dydaktycznych. Użytkownik mógł przemieszczać się pomiędzy pomieszczeniami, takimi jak kuchnia, pokój dzienny, łazienka czy sypialnia, eksplorując otoczenie w sposób zbliżony do rzeczywistego. Aplikacja została uruchomiona na urządzeniu HoloLens 2, wykorzystując wbudowany moduł śledzenia wzroku (eye-tracking) jako główny mechanizm interakcji (rysunek 1).



Rysunek 1. Scena widziana z poziomu użytkownika aplikacji. Aplikacja opisuje wskazany wzrokiem obiekt
Źródło: opracowanie własne.

Celem edukacyjnym aplikacji było poznawanie słownictwa z zakresu gospodarstwa domowego poprzez obserwowanie obiektów znajdujących się w poszczególnych pomieszczeniach. W momencie skierowania wzroku na wybrany element otoczenia system automatycznie wyświetlał jego nazwę w języku polskim i angielskim, a także odtwarzał nagranie wymowy, angażując równocześnie kanał wzrokowy i słuchowy. Rozwiązanie to umożliwiało kontekstowe uczenie się osadzone w realistycznej przestrzeni mieszkalnej.

Dodatkowo użytkownik mógł wchodzić w bezpośrednią interakcję z wirtualnymi przedmiotami – chwytać je, przenosić, obracać oraz manipulować prostymi mechanizmami. Interakcje te oparto na gestach rozpoznawanych przez HoloLens 2, co pozwalało badać zarówno intuicyjność

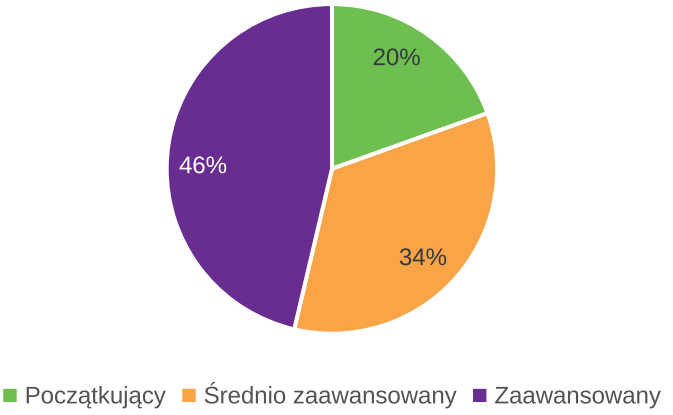
manipulacji obiektami, jak i ergonomię ruchową w środowisku MR. Dzięki temu symulator pełnił funkcję kompleksowej platformy do analizy poznawczej, motorycznej i językowej aktywności użytkownika.

Badanie miało charakter eksploracyjny i obejmowało test interfejsu stworzonego w Unity 3D i uruchamianego na zestawie HoloLens 2 (rysunek 2). W pracy wykorzystano podejście mieszane: ankietę ilościową i analizę jakościową odpowiedzi otwartych.



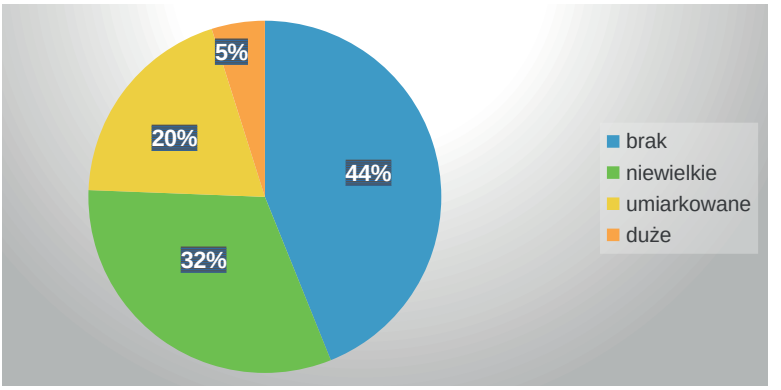
Rysunek 2. Scena wykorzystana w badaniu
Źródło: opracowanie własne.

W badaniu uczestniczyło 41 osób (23 kobiety, 18 mężczyzn), głównie w wieku 18-25 lat (65%), co odpowiada typowej grupie użytkowników wykazującej wysoką gotowość adaptacyjną do MR. Kolejne 25% stanowiły osoby w wieku 26-35 lat, a 10% uczestników było starszych niż 35 lat. Poziom znajomości języków obcych był zróżnicowany: 46% określiło się jako średniozaawansowani, 34% jako zaawansowani, a 20% jako początkujący (rysunek 3).



Rysunek 3. Poziom znajomości języka obcego
Źródło: opracowanie własne.

Doświadczenie z MR okazało się niewielkie: 76% miało brak lub bardzo małe obycie z tą technologią, 19% umiarkowane, a 5% duże (rysunek 4).



Rysunek 4. Doświadczenie z technologią MR
Źródło: opracowanie własne.

Zastosowany kwestionariusz, oparty na literaturze z zakresu HCI i edukacji immersyjnej, składał się z trzech części:

- danych demograficznych i informacji o doświadczeniu technologicznym,

- dwunastu stwierdzeń ocenianych na pięciostopniowej skali Likerta dotyczących m.in. intuicyjności obsługi, czytelności ikon, estetyki, płynności przejść i komfortu fizycznego,
- pytań otwartych dotyczących elementów ułatwiających i utrudniających naukę oraz czynników dyskomfortu. Dodatkowo uczestnicy oceniali ogólne wrażenia z aplikacji w skali 1-10 oraz deklarowali gotowość do ponownego korzystania z MR.

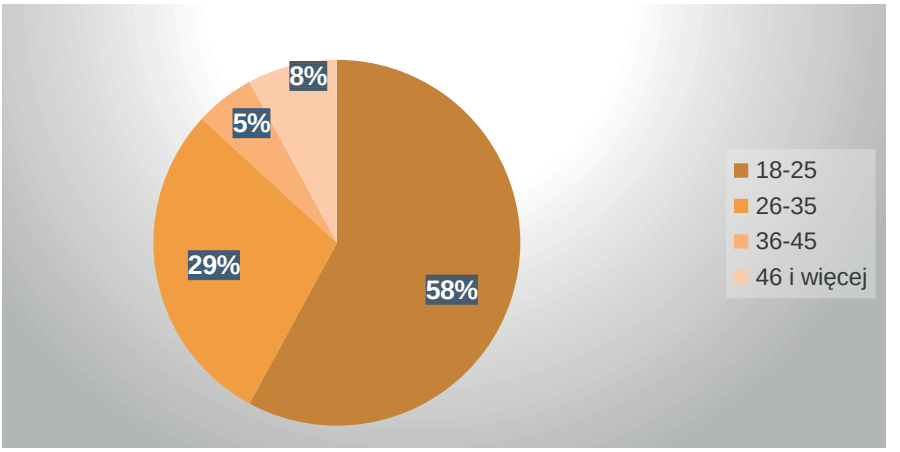
Choć próba była ograniczona liczebnie i obejmowała głównie osoby młode, zebrane dane pozwoliły uchwycić rzeczywiste trudności użytkowników. Ograniczeniem pozostaje zastosowanie jednego prototypu, co utrudnia pełne uogólnienia. Mimo to przyjęto metodologię, zgodną ze standardami badań HCI (ISO 9241-210:2019) oraz praktykami ewaluacji środowisk immersyjnych (VRUSE; Usoh i in., 1999), pozwalającą jednak na porównanie uzyskanych wyników z wcześniejszymi badaniami nad interfejsami edukacyjnymi XR (Makransky, Petersen, 2021; Panagiotidis, 2021). W ten sposób badanie stanowi wiarygodny punkt wyjścia do dalszych analiz ilościowych i eksperymentalnych, ukierunkowanych na optymalizację projektowania interfejsów MR w dydaktyce językowej.

Wyniki badań ankietowych

Badanie ankietowe dostarczyło danych dotyczących sposobu, w jaki użytkownicy postrzegali interfejs MR, napotykanych trudności oraz czynników wpływających na komfort i efektywność nauki języka obcego. Dane ilościowe połączono z obserwacjami i analizą wypowiedzi otwartych, co pozwoliło uzyskać pełniejszy obraz doświadczeń użytkowników.

Charakterystyka respondentów

Respondenci różnili się doświadczeniem językowym i technologicznym, a dominującą grupę stanowili młodzi dorośli (18-25 lat) bez wcześniejszego kontaktu z MR (rysunek 3). Taki profil redukuje efekt eksperta i pozwala analizować interakcję z interfejsem z perspektywy użytkownika początkującego. Zróżnicowany poziom znajomości języka umożliwił obserwację, jak kompetencje językowe wpływają na percepcję trudności poznawczych w środowisku MR.



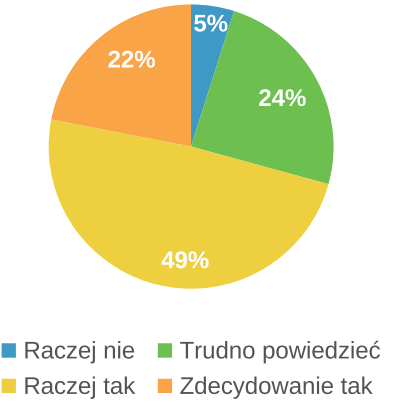
Rysunek 5. Struktura wieku uczestników
Źródło: opracowanie własne.

Ogólna ocena interfejsu

Większość uczestników oceniła interfejs pozytywnie: 78% uznało go za intuicyjny, 71% wskazało na sprzyjającą nauce kolorystykę, a 60% potwierdziło, że zadania i etykiety wspierały proces uczenia się (rysunek 6).

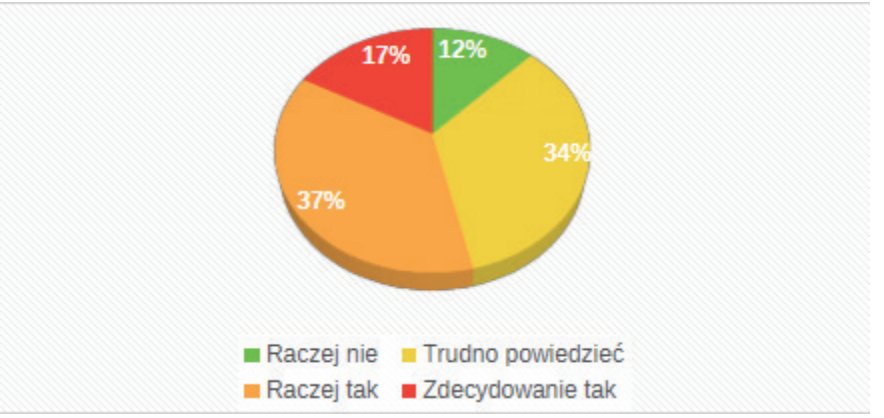


Rysunek 6. Ocena interfejsu aplikacji pod kątem intuicyjności i łatwości w obsłudze
Źródło: opracowanie własne.



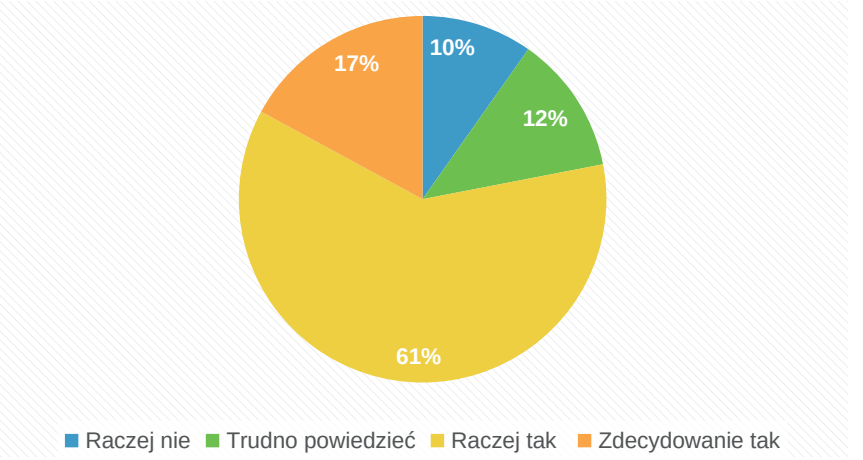
Rysunek 7. Ocena kolorystyki i kontrastu pod kątem zrozumienia treści
Źródło: opracowanie własne.

Niżej oceniono płynność przejść między zadaniami, co wiązało się z opóźnieniami reakcji systemu i brakiem natychmiastowego sprzężenia zwrotnego (rysunek 8).



Rysunek 8. Ocena płynności przejść między etapami lekcji
Źródło: opracowanie własne.

Jednocześnie 78% respondentów uznało rozmieszczenie elementów w przestrzeni za logiczne, zgodne z zasadami percepcji trójwymiarowej (rysunek 9).



Rysunek 9. Jakość logiki, rozmieszczenia elementów i płynność aplikacji
Źródło: opracowanie własne.

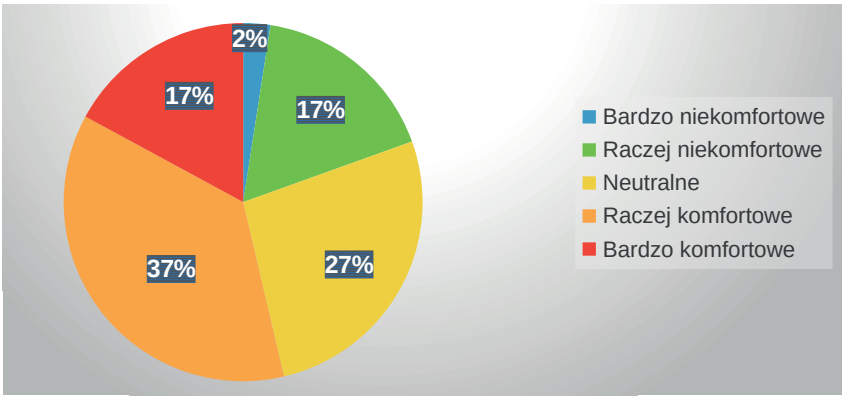
Ogólna ocena aplikacji wyniosła 7,48 (przy odchyleniu standardowym równym 1,1), a 95% badanych zadeklarowało gotowość dalszego korzystania z MR, co pozostaje zbieżne z obserwowaną w literaturze wysoką akceptacją technologii XR w edukacji (Chen, 2022; Wang i in., 2020).

Elementy problematyczne i bariery ergonomiczne

Najczęściej zgłaszanym problemem była niska precyzja rozpoznawania gestów (37%). Trudności te korespondują z wynikami badań nad gestami „hipernaturalnymi", które zwiększają immersję, ale obniżają dokładność manipulacji (Yu, Bowman, 2018). Kolejne problemy obejmowały opóźnienia animacji, niejednoznaczne sygnały zakończenia zadań oraz błędne interpretowanie braku reakcji systemu jako błędu użytkownika, co wskazuje na niewystarczająca informacja zwrotna – kluczowy element skutecznej prezentacji informacji (Mayer, 2001). Problemy z czytelnością ikon, kontrastem i zagęszczeniem obiektów zwiększały obciążenie poznawcze zewnętrzne, zgodnie z założeniami teorii obciążenia poznawczego (Sweller, 1988).

Komfort fizyczny

Komfort użytkowania oceniono na 7,48/10, przy czym 64% uznało doświadczenie za komfortowe, a 19% za niekomfortowe. Najczęściej wymieniano zmęczenie oczu, konieczność długotrwałego unoszenia dłoni, opóźnienia śledzenia ruchu oraz dezorientację przestrzenną przy gwałtownych zmianach sceny. Zjawiska te odpowiadają mechanizmom choroby symulatorowej opisywanym w literaturze (Saredakis i in., 2020) oraz czynnikom takim jak liczba klatek na sekundę, pole widzenia czy złożoność sceny (Ragan i in., 2015). Uczestnicy podkreślali również potrzebę personalizacji – regulacji wielkości etykiet, poziomu szczegółowości sceny czy czułości gestów, co pozostaje zgodne z założeniami adaptacyjnych interfejsów MR (Makransky, Petersen, 2021; Panagiotidis, 2021).



Rysunek 10. Subiektywny komfort użytkowania MR
Źródło: opracowanie własne.

Syntetyczna interpretacja

Wyniki potwierdzają, że odpowiednio zaprojektowany interfejs MR zwiększa motywację i zaangażowanie uczniów. Największe wyzwania dotyczą jednak precyzji gestów, opóźnień reakcji i braku mikroinformacji zwrotnych, co może zwiększać obciążenie poznawcze (Sweller, 1988; Mayer, 2001). Pozytywne oceny dotyczące warstwy wizualnej sugerują zgodność z zasadami ergonomii percepcyjnej, jednak kluczowe trudności koncentrują się wokół interakcji i dynamiki informacji zwrotnej. Zgodnie z literaturą

skuteczność XR zależy przede wszystkim od jakości projektu dydaktycznego i interfejsu, a nie samej technologii (Chen, 2022; Coban i in., 2022).

Dyskusja wyników i implikacje dla projektowania interfejsów MR

Analiza wyników badania, zestawiona z literaturą dotyczącą HCI i edukacji immersyjnej, pozwala wskazać cztery kluczowe obszary wpływające na jakość interakcji w aplikacjach MR: naturalność interakcji, jakość informacji zwrotnej, złożoność wizualną oraz ergonomię fizyczną i dostępność.

Naturalność interakcji a precyzja sterowania

Użytkownicy wysoko oceniali immersyjny charakter interakcji gestowych, jednak zgłaszali trudności z precyzją wykonywania poleceń. Nadmiernie „hipernaturalne" gesty mogą zwiększać wysiłek motoryczny i prowadzić do spadku efektywności uczenia się, co jest zgodne z założeniami ucieleśnionego poznania, które podkreśla konieczność równowagi między aktywnością ruchową a procesami poznawczymi (Wilson, 2002).

Zjawisko zmęczenia gestowego jest naturalnym skutkiem nadmiernego obciążenia układu ruchowego, co potwierdzają wcześniejsze modele immersji i obecności (Slater, Wilbur, 1997). W efekcie projektowanie interfejsów MR powinno łączyć intuicyjność gestów z mechanizmami zapewniającymi wysoką precyzję, np. dynamicznym przełączaniem metod interakcji.

Informacja zwrotna i kontrola poznawcza

Respondenci podkreślali znaczenie natychmiastowej i jednoznacznej informacji zwrotnej, której brak powodował dezorientację oraz obniżał płynność interakcji. Badania pokazują, że brak spójnego sprzężenia zwrotnego w środowisku 3D zwiększa obciążenie poznawcze i wydłuża czas reakcji (Ragan i in., 2015). Zgodnie z modelem CAMIL skuteczność środowisk immersyjnych zależy od równowagi między kontrolą poznawczą, afektem i immersją; mikroinformacja zwrotna pełni tu rolę kluczowego regulatora, podtrzymującego poczucie sprawstwa i orientację użytkownika (Makransky, Petersen, 2021). W badanym prototypie niedostateczna jakość mikroinformacji była jednym z głównych źródeł utraty kontroli poznawczej.

Złożoność wizualna i obciążenie poznawcze

Użytkownicy zgłaszali trudności wynikające z nadmiernego zagęszczenia elementów wizualnych, niskiego kontrastu lub zasłaniania. Zgodnie z teorią obciążenia poznawczego nadmiar bodźców zwiększa obciążenie zewnętrzne, utrudniając koncentrację na zadaniu dydaktycznym (Sweller, 1988). Wyniki badań potwierdzają, że wysoka złożoność sceny 3D wydłuża czas reakcji i obniża precyzję lokalizacji obiektów (Ragan i in., 2015).

W kontekście dydaktycznym oznacza to konieczność projektowania interfejsów MR umożliwiających redukcję złożoności wizualnej, np. poprzez wygaszanie elementów tła czy upraszczanie tekstur podczas zadań wymagających zwiększonej koncentracji.

Ergonomia fizyczna i dostępność

Mimo ogólnie dobrej oceny komfortu użytkowania część badanych doświadczała zmęczenia oczu, ramion i szyi, zwłaszcza podczas zadań wymagających utrzymywania rąk w polu widzenia czujników. Objawy dezorientacji przestrzennej potwierdzają znaczenie ergonomii fizycznej i właściwej adaptacji sceny do możliwości użytkownika i warunków otoczenia (rysunek 11).



Rysunek 11. Przykład sceny niedopasowanej do przestrzeni fizycznej
Źródło: opracowanie własne.

Z perspektywy dostępności zgłaszane trudności z małą skalą ikon czy brakiem personalizacji potwierdzają konieczność stosowania zasad projektowania uniwersalnego – w tym regulacji wielkości czcionek, kontrastu oraz alternatywnych metod interakcji (np. gaze-based interaction). Rozwiązania te sprzyjają równowadze między immersją a komfortem użytkownika, co jest kluczowe dla długotrwałego wykorzystania MR w edukacji.

Wnioski

Przeprowadzone badania potwierdzają, że kluczowym czynnikiem determinującym skuteczność aplikacji mieszanej rzeczywistości w nauce języków obcych jest jakość interfejsu użytkownika, a nie sam poziom zanurzenia technologicznego. O efektywności dydaktycznej decyduje przede wszystkim precyzja i płynność interakcji, niskie obciążenie poznawcze oraz komfort fizyczny użytkownika. Uczestnicy wysoko ocenili intuicyjność i przejrzystość interfejsu, jednak największe trudności sprawiały im problemy z dokładnością gestów i szybkością reakcji systemu. Wyniki te wskazują na konieczność stosowania hybrydowych modeli interakcji, które łączą naturalność gestów z precyzją tradycyjnych metod sterowania. Istotnym elementem skutecznego interfejsu jest natychmiastowa i jednoznaczna informacja zwrotna – wzrokowa, dźwiękowa i dotykowa – ponieważ brak reakcji systemu wywołuje frustrację i dezorientację. Z perspektywy ergonomii poznawczej fundamentalne znaczenie ma ograniczenie złożoności wizualnej środowiska i stosowanie zasad prostoty, które redukują zbędne obciążenie poznawcze i ułatwiają koncentrację na treściach edukacyjnych. Badanie potwierdziło również, że sesje edukacyjne w mieszanej rzeczywistości powinny być krótkie i modułowe, trwające maksymalnie 20-25 minut, ze względu na ryzyko zmęczenia wzroku i dezorientacji.

Ponadto użytkownicy oczekują wysokiej dostępności i możliwości dostosowania interfejsu, obejmującej regulację skali elementów, kontrastu czy czułości gestów, co jest zgodne z założeniami projektowania uniwersalnego oraz normami technicznymi dotyczącymi dostępności w technologiach rozszerzonej rzeczywistości. W wymiarze dydaktycznym mieszana rzeczywistość sprzyja zapamiętywaniu i motywacji, o ile interfejs jest ergonomicznie

i poznawczo zoptymalizowany. Łączenie inteligentnego dostosowywania, wielomodalnej informacji zwrotnej oraz wizualnej prostoty stanowi fundament projektowania skutecznych środowisk edukacyjnych w mieszanej rzeczywistości. Jednocześnie dalsze badania powinny obejmować kontrolowane eksperymenty nad wpływem różnych sposobów interakcji oraz integrację danych edukacyjnych z parametrami technicznymi systemu, co pozwoli opracować bardziej precyzyjne modele skuteczności interfejsów rozszerzonej i mieszanej rzeczywistości. Podsumowując, mieszana rzeczywistość ma wysoki potencjał dydaktyczny, jednak jego pełne wykorzystanie wymaga świadomego, ergonomicznego projektowania interfejsu użytkownika zgodnie z zasadami ergonomii poznawczej i ucieleśnionego uczenia się.

Literatura

1. Accot, J., Zhai, S. (1997). *Beyond Fitts' law: models for trajectory-based HCI tasks*. Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (s. 295-302). https://doi.org/10.1145/258549.258760
2. Chen, B., Wang, Y., Wang, L. (2022). The Effects of Virtual Reality-Assisted Language Learning: A Meta-Analysis. *Sustainability, 14*(6), 3147. https://doi.org/10.3390/su14063147
3. Chen, J., Dai, J., Zhu, K., Xu, L. (2022). Effects of extended reality on language learning: A meta-analysis. *Frontiers in Psychology, 13*. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.1016519
4. Coban, M., Bolat, Y. I., Goksu, I. (2022). The potential of immersive virtual reality to enhance learning: A meta-analysis. *Educational Research Review, 36*, 100452. https://doi.org/10.1016/j.edurev.2022.100452
5. Fitts, P. M. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology, 47*(6), 381-391. https://doi.org/10.1037/h0055392
6. Makransky, G., Petersen, G. B. (2021). The Cognitive Affective Model of Immersive Learning (CAMIL): a Theoretical Research-Based Model of Learning in Immersive Virtual Reality. *Educational Psychology Review, 33*, 937-958. https://doi.org/10.1007/s10648-020-09586-2
7. Mayer, R. E. (2001). *Multimedia Learning*. Cambridge University Press.
8. Panagiotidis, P. (2021). Augmented and Mixed Reality in Language Learning. *European Journal of Education, 4*(2), 28. https://doi.org/10.26417/501ibq23c

9. Parong, J., Mayer, R. E. (2018). Learning science in immersive virtual reality. *Journal of Educational Psychology, 110*(6), 785-797. https://doi.org/10.1037/edu0000241
10. Radianti, J., Majchrzak, T. A., Fromm, J., Wohlgenannt, I. (2020). A systematic review of immersive virtual reality applications for higher education: Design elements, lessons learned, and research agenda. *Computers & Education, 147*, 103778. Sciencedirect. https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103778
11. Ragan, E. D., Bowman, D. A., Kopper, R., Stinson, C., Scerbo, S., McMahan, R. P. (2015). Effects of Field of View and Visual Complexity on Virtual Reality Training Effectiveness for a Visual Scanning Task. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 21*(7), 794-807. https://doi.org/10.1109/tvcg.2015.2403312
12. Saredakis, D., Szpak, A., Birckhead, B., Keage, H. A. D., Rizzo, A., Loetscher, T. (2020). Factors Associated With Virtual Reality Sickness in Head-Mounted Displays: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Frontiers in Human Neuroscience, 14*(96). https://doi.org/10.3389/fnhum.2020.00096
13. Shuai, K., Li, Y., Liang, H.-N. (2023). *Effects of Object Complexity in Occlusion, Structure, and Texture on 3D Virtual Object Observation in Virtual Reality*. 2023 Asia Conference on Cognitive Engineering and Intelligent Interaction (CEII), 24-28. https://doi.org/10.1109/ceii60565.2023.00013
14. Slater, M., Wilbur, S. (1997). A Framework for Immersive Virtual Environments (FIVE): Speculations on the Role of Presence in Virtual Environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 6*(6), 603-616. https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.6.603
15. Sweller, J. (1988). Cognitive Load during Problem Solving: Effects on Learning. *Cognitive Science, 12*(2), 257-285. https://doi.org/10.1207/s15516709cog1202_4
16. Wang, C. pang, Lan, Y. J., Tseng, W. T., Lin, Y. T. R., Gupta, K. C. L. (2020). On the effects of 3D virtual worlds in language learning – a meta-analysis. *Computer Assisted Language Learning, 33*(8), 891-915. https://doi.org/10.1080/09588221.2019.1598444
17. Wilson, M. (2002). Six views of embodied cognition. *Psychonomic Bulletin & Review, 9*(4), 625-636. https://doi.org/10.3758/bf03196322
18. Yu, R., Bowman, D. A. (2018). *Force Push: Exploring Expressive Gesture-to-Force Mappings for Indirect 3D Object Manipulation*. 2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR), 733-734. https://doi.org/10.1109/vr.2018.8446453