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_5

PROBLEMY ERGONOMII I PRECYZJI W IMPLEMENTACJI INTERAKCJI 3D W APLIKACJACH VR

ERGONOMICS AND PRECISION ISSUES IN IMPLEMENTING 3D INTERACTIONS IN VR APPLICATIONS

Streszczenie

Rzeczywistość wirtualna (VR) oraz mieszana (MR) umożliwiają przeniesienie użytkownika w interaktywną przestrzeń trójwymiarową, w której ciało staje się naturalnym interfejsem sterującym. Choć technologia ta otwiera ogromne możliwości, jej skuteczne wdrożenie wiąże się z licznymi problemami natury technicznej, ergonomicznej i poznawczej. Rozdział przedstawia analizę problemów ergonomii, precyzji i potoku przetwarzania w implementacji interakcji 3D w środowisku Unity z użyciem urządzeń HoloLens 2 oraz Meta Quest 3. Szczególną uwagę poświęcono zagadnieniom naturalności gestów, precyzji manipulacji, kolizji i przenikania, sprzężenia zwrotnego oraz ergonomii długotrwałego użytkowania. W pracy zaprezentowano także propozycję rozwiązania problemów importu modeli 3D poprzez implementację wewnętrznego konwertera osi i punktu odniesienia w Unity. Rozdział ma charakter aplikacyjno-badawczy, łączący analizę sprzętu, środowiska programistycznego oraz czynników wpływających na komfort użytkownika.

Słowa kluczowe: wirtualna rzeczywistość, komunikacja człowiek-komputer, interakcja 3D, naturalny interfejs użytkownika

[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

Virtual Reality (VR) and Mixed Reality (MR) enable the user to be transported into an interactive three-dimensional space, where their body becomes a natural control interface. While this technology offers immense possibilities, its effective implementation involves numerous technical, ergonomic, and cognitive challenges. This chapter presents an analysis of issues related to ergonomics, precision, and the processing pipeline in the implementation of 3D interaction within the Unity environment using HoloLens 2 and Meta Quest 3 devices. Particular attention is paid to the naturalness of gestures, precision of manipulation, collisions and clipping, feedback mechanisms, and the ergonomics of prolonged use. The work also presents a proposed solution to 3D model import problems through the implementation of an internal axis and pivot point converter in Unity. The chapter is of an applied and research nature, combining an analysis of the hardware, the development environment, and factors influencing user comfort.

Keywords: virtual reality, human-computer interaction, 3D interaction, natural user interface

Wstęp

Wirtualna i mieszana rzeczywistość są jednymi z najbardziej dynamicznie rozwijających się dziedzin technologii interakcji człowiek-komputer (Souchet i in., 2022; Chen, 2023). W przeciwieństwie do klasycznych interfejsów opartych na ekranie i klawiaturze, VR oraz MR umożliwiają pełne zanurzenie w środowisku cyfrowym i manipulowanie obiektami w sposób zbliżony do rzeczywistego, co obejmuje zaawansowane techniki takie jak chwytanie obiektów w czasie rzeczywistym (Tian i in., 2018; Tian i in., 2019) czy interakcje bimodalne (Kim, Park, 2014). W tym kontekście ciało użytkownika staje się integralnym elementem interfejsu – dłonie, wzrok i głos pełnią funkcje sterujące, a doświadczenie odbioru nabiera charakteru multisensorycznego, w tym interakcje oparte na śledzeniu wzroku (Wang i in., 2024; Han i in., 2019) oraz multimodalne manipulacje z agentami wirtualnymi (Bazargani, Choi, 2025).

Jakość doświadczenia zależy jednak nie tylko od jakości grafiki i wydajności sprzętu, lecz przede wszystkim od naturalności i wygody interakcji, co podkreślają badania porównujące różne paradygmaty interakcji, takie jak gesty siłowe czy manipulacje pośrednie (Yu, Bowman, 2018; Pakkanen i in., 2017; Miller i in., 2018). Jeśli użytkownik zmuszony jest do wykonywania

nienaturalnych gestów lub system reaguje z opóźnieniem, immersja zostaje przerwana, co może prowadzić do efektu „gorilla arm" związanego z zmęczeniem fizycznym (Purdue University, 2017; Sanders i in., 2023). Kluczową rolę odgrywają więc ergonomia i precyzja implementacji – dwa czynniki, które warunkują odbiór całego środowiska, w tym w scenariuszach medycznych czy szkoleniowych (Ferrari i in., 2023; Tütüncü i in., 2025).

Jednym z najważniejszych parametrów technicznych wpływających na komfort jest liczba klatek na sekundę. Przyjmuje się, że aby uniknąć dyskomfortu i choroby symulatorowej, obraz powinien być renderowany z częstotliwością nie mniejszą niż 72 Hz, przy optymalnym zakresie 90-120 Hz (Pohl i in., 2018; Lysenko i in., 2023). Dodatkowo istotna jest latencja, czyli opóźnienie między ruchem użytkownika a reakcją systemu, co porównywano w kontekście śledzenia dłoni versus kontrolerów (Steed i in., 2025; Wired, 2013). Suma opóźnień wynosi:

$$t_{opóźnienia} = t_{renderowania} + t_{transmisji} + t_{wyświetlania} \quad (1)$$

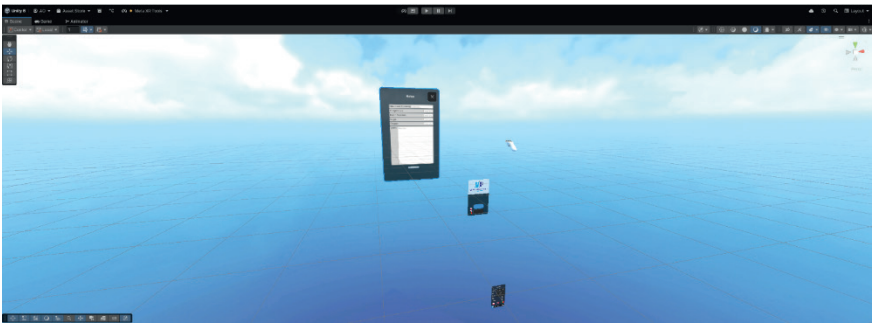
gdzie poszczególne składniki odpowiadają za czas renderowania, transmisji i wyświetlania. Nawet niewielkie wartości rzędu kilkudziesięciu milisekund mogą skutkować utratą wrażenia immersji.

Metodologia

Badania i analizę zagadnień ergonomii oraz precyzji przeprowadzono na grupie 46 respondentów z wykorzystaniem urządzenia Meta Quest 3 w pełni immersyjnym systemem VR z możliwością włączenia trybu podglądu świata rzeczywistego w rzeczywistości mieszanej (passthrough MR).

Meta Quest 3 to urządzenie VR, wyposażone w procesor Snapdragon XR2 Gen 2, wyświetlacze o rozdzielczości 2064×2208 pikseli na każde oko oraz częstotliwość odświeżania 120 Hz. Urządzenie wykorzystuje cztery kamery RGB do śledzenia położenia i ruchów dłoni oraz kontrolery Touch Plus z zaawansowaną haptyką. Quest 3 umożliwia również korzystanie z trybu mieszanej rzeczywistości, dzięki czemu użytkownik może zobaczyć otoczenie przez kamery i wykonywać interakcje w przestrzeni półrzeczywistej.

Oprogramowanie i środowisko testowe

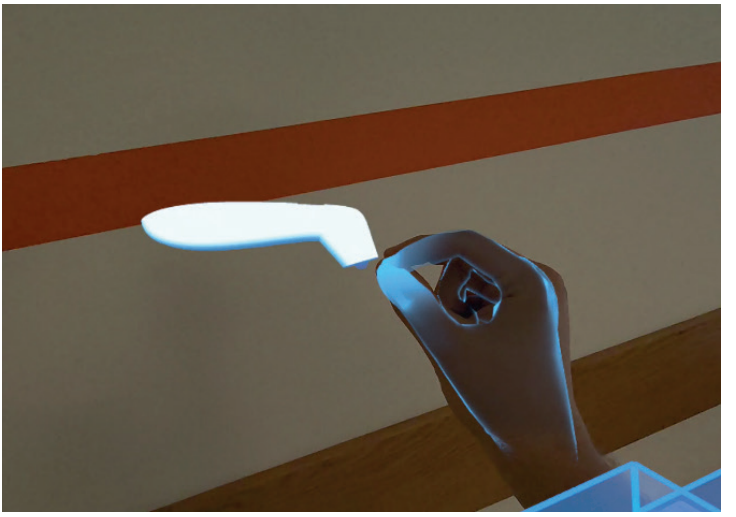


Rysunek 1. Scena testowa wykorzystywana do tworzenia aplikacji na urządzenia VR/MR
Źródło: opracowanie własne.

Badania przeprowadzono w środowisku Unity 6 z wykorzystaniem pakietów XR Interaction Toolkit, Oculus Integration, OpenXR Plugin oraz MRTK (Mixed Reality Toolkit). Opracowano autorskie aplikacje testowe pozwalające na interakcje takie jak chwytanie, przesuwanie, obsługę menu 3D oraz kalibrację pozycji użytkownika. W obu środowiskach skonfigurowano moduł XR Rig, zapewniający spójną strukturę kamery, kontrolerów i przestrzeni interakcji. Unity odgrywa kluczową rolę w tworzeniu interakcji 3D, szczególnie w środowiskach VR/MR, gdzie wymagane jest realistyczne odwzorowanie fizyki, kolizji i sprzężenia zwrotnego. Pipeline XR Interaction Toolkit obsługuje interakcje bezpośrednie (Direct Interactor) oraz pośrednie (Ray Interactor), pozwalając użytkownikowi na manipulację obiektami przez dotyk lub wskazanie. W Meta Quest 3 integracja z Oculus SDK umożliwia haptykę i śledzenie dłoni np. funkcja OVRInput.SetControllerVibration wywołuje wibracje kontrolera przy kontakcie z obiektem, wzmacniając realizm. W HoloLens 2 interakcje opierają się na gestach i śledzeniu spojrzenia za pomocą MRTK, co zwiększa naturalność, lecz wymaga dużej precyzji ruchu. Stabilność śledzenia dłoni poprawia interpolacja pozycji według równania wygładzania z parametrem $\alpha=0.2$, redukująca drgania bez zauważalnych opóźnień.

Problemy ergonomii i precyzji interakcji

Jednym z głównych problemów jest nienaturalność gestów, zmuszająca użytkownika do długiego unoszenia rąk, co prowadzi do zmęczenia mięśni („gorilla arm problem"). Aby temu zapobiec, strefa interakcji powinna obejmować przestrzeń od klatki piersiowej do oczu, w odległości około jednego metra. W Unity można to uzyskać poprzez kalibrację modułu XR Rig i dopasowanie wysokości interfejsu do wzrostu użytkownika. Realizm zwiększają wielopunktowe uchwyty (grab points) oraz mechanizm przyciągania dłoni, który automatycznie dopasowuje jej pozycję i rotację do kształtu obiektu.



Rysunek 2. Błędnie skonfigurowane punkty uchwytu
Źródło: opracowanie własne.

Drugim istotnym problemem jest precyzja interakcji (rysunek 2). W słabym oświetleniu śledzenie dłoni może być niestabilne, a szybkie ruchy kontrolerów powodują błędy pozycji. Aby zwiększyć dokładność, stosuje się powiększone obiekty hitbox – niewidzialne bryły kolizyjne większe od obiektu wizualnego – oraz promień (raycast) wychodzący z kontrolera, działający jak laserowy wskaźnik. Dzięki temu nie jest wymagane precyzyjne celowanie dłonią, a interakcja staje się płynniejsza. Minimalny rozmiar elementu interaktywnego powinien wynosić 1,5-2 cm, co odpowiada możliwościom percepcji przestrzennej w VR.



Rysunek 3. Przenikanie przez obiekt bez sprzężenia wstecznego
Źródło: opracowanie własne.

Jednym z czynników zaburzających immersję jest efekt przenikania obiektów (rysunek 3). Jeśli ręka użytkownika przechodzi przez ścianę lub obiekt, cała iluzja rzeczywistości natychmiast znika. W Unity problem ten rozwiązuje się poprzez poprawne konfigurowanie detektorów kolizji oraz warstw fizyki. Detektory typu Box lub Mesh muszą dokładnie odpowiadać kształtom modeli, a Rigidbody nadaje im właściwości fizyczne. Dodatkowo warto zastosować sprzężenie haptyczne – nawet jeśli fizyczna kolizja nie zostanie wymuszona, wibracja kontrolera w chwili kontaktu pozwala użytkownikowi poczuć dotknięcie powierzchni. Dzięki temu zmysł dotyku zostaje zintegrowany z obrazem, co znacząco zwiększa realizm doświadczenia.

Problem braku sprzężenia zwrotnego

Brak informacji zwrotnej po wykonanej akcji jest jednym z najczęstszych błędów projektowych w aplikacjach VR. W interakcji dotykowej użytkownik oczekuje reakcji – kliknięcia, błysku lub dźwięku. Jeśli ich zabraknie, pojawia się niepewność czy system zarejestrował akcję. Dlatego interfejsy VR projektuje się w oparciu o trzy typy feedbacku: wizualny (np. podświetlenie

obiektu przy najechaniu), dźwiękowy (krótki ton potwierdzający kliknięcie) oraz haptyczny (impuls wibracji). Każdy z tych kanałów wzmacnia immersję i redukuje błędy użytkownika.

Problem ergonomii długotrwałej

Długotrwałe użytkowanie środowisk VR może prowadzić do przeciążenia fizycznego i poznawczego. Użytkownicy odczuwają zmęczenie ramion, karku i wzroku, a w skrajnych przypadkach – dezorientację przestrzenną. Aby temu przeciwdziałać, interfejsy powinny być rozmieszczone w ergonomicznej odległości, z wykorzystaniem przycisków typu toggl*e* zamiast hold, które nie wymagają ciągłego naciskania. Dodatkowo należy wprowadzić kalibrację postawy użytkownika poprzez dynamiczne dostosowanie wysokości kamery w module XR Rig. Takie rozwiązanie pozwala każdemu użytkownikowi na dopasowanie interfejsu do jego wzrostu i pozycji, co zwiększa wygodę i naturalność interakcji.

Propozycje rozwiązań problemów ergonomii i precyzji w aplikacjach VR/MR

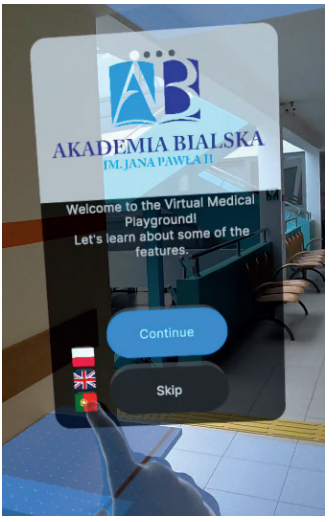
Najczęstszym źródłem dyskomfortu w VR/MR są gesty wymuszające nienaturalną postawę lub nadmierne unoszenie rąk. Aby temu zapobiec, interfejs należy projektować w zgodzie z fizjologicznym zakresem ruchu – strefa interakcji powinna znajdować się 0,5-1,2 m od ciała, między klatką piersiową a oczami. W Unity można zastosować kalibrację wzrostu użytkownika, która automatycznie dostosowuje wysokość interfejsu do jego pozycji. Komfort zwiększa także mechanizm tolerancji chwytu i wielopunktowe obszary grab points, dzięki którym system sam dopasowuje pozycję dłoni do obiektu, zapewniając większy realizm i naturalność interakcji.

Precyzja interakcji w VR zależy od jakości śledzenia ruchu dłoni i kontrolerów. Aby ją zwiększyć, stosuje się filtry wygładzające eliminujące drgania, powiększone detektory kolizji oraz mechanizm przyciągania (snap), który automatycznie ustawia obiekt w dłoni. W interfejsach 3D skutecznie sprawdza się moduł XR Ray Interactor, pozwalający wybierać elementy

z dystansu bez konieczności dokładnego dotykania przycisków. W aplikacjach wymagających dużej precyzji można dodatkowo zastosować skalowanie przestrzeni interakcji, co umożliwia bardziej dokładne manipulacje.

Jednym z głównych problemów obniżających immersję w VR jest przenikanie dłoni i obiektów przez elementy sceny. Aby temu zapobiec, w Unity stosuje się filtrowanie warstw fizycznych (Physics Layers) i przypisywanie obiektom odpowiednich kategorii kolizji, dzięki czemu ręce użytkownika wchodzą w interakcję tylko z elementami aktywnymi. Realizm zwiększa także system haptyki – krótkie wibracje kontrolera informują o kontakcie z obiektem, a w połączeniu z efektami wizualnymi i dźwiękowymi tworzą pełne wrażenie dotyku. Dodatkowo można zastosować symulację oporu ruchu, spowalniając animację dłoni przy kolizji, co daje złudzenie fizycznej bariery.

Długotrwałe korzystanie z gogli VR wymaga minimalizowania obciążenia mięśniowego i poznawczego. Aby to osiągnąć, należy projektować interfejsy w sposób dostosowany do fizjologii człowieka. Elementy UI powinny być rozmieszczone na poziomie wzroku, w odległości około 1 metra od użytkownika, co pokazano na rysunku 4. Wysokość i kąt nachylenia menu można ustawić automatycznie na podstawie kalibracji XR Rig.



Rysunek 4. Interfejs na odpowiedniej wysokości i w zasięgu ramion
Źródło: opracowanie własne.

Ważnym elementem jest również zmiana sposobu aktywacji przycisków. Długotrwałe trzymanie przycisków („hold") prowadzi do przeciążenia dłoni, dlatego lepiej stosować przyciski typu toggle, które reagują jednym kliknięciem.

Aby dodatkowo zwiększyć komfort, warto wprowadzić tryb adaptacyjny – system analizuje pozycję użytkownika w czasie i przesuwa elementy interfejsu, jeśli wykryje zmianę postawy (np. siedzenie zamiast stania). Takie podejście minimalizuje konieczność podnoszenia rąk i pozwala zachować naturalny rytm pracy w VR.

Zaprezentowane rozwiązania stanowią uniwersalne zasady projektowania interakcji XR. Naturalność gestów zapewnia kalibracja postawy i wielopunktowy chwyt, precyzję – mechanizmy przyciągania i promienie interakcji, kolizje – odpowiednia konfiguracja warstw fizyki, sprzężenie zwrotne – sygnały wizualne, dźwiękowe i haptyczne, a ergonomię – adaptacyjny układ interfejsu ograniczający ruchy ramion. Połączenie tych elementów tworzy intuicyjny system, w którym użytkownik działa naturalnie, a środowisko VR/MR reaguje zgodnie z jego oczekiwaniami, stanowiąc solidną podstawę dla przyszłych zastosowań w nauce i przemyśle.

Problemy przetwarzania 3D i importu modeli

W tworzeniu aplikacji XR kluczowa jest nie tylko ergonomia, lecz także poprawność techniczna potoku 3D. Modele z programów takich jak Blender, 3ds Max czy Maya muszą być prawidłowo importowane do Unity. Częstym problemem jest niezgodność układów współrzędnych – Blender używa Z-up, a Unity Y-up, co wymaga konwersji według wzoru (2):

$$(x, y, z)_{Blender} \rightarrow (x, z, -y)_{Unity} \tag{2}$$

Błędy dotyczą także osi obrotu i punktów pivot, które przy złym ustawieniu powodują nienaturalne ruchy obiektów. Różnice w skali jednostek sprawiają, że modele pojawiają się z nieprawidłowym rozmiarem, zaburzając poczucie przestrzeni. Ważna jest również poprawność normalnych i materiałów – błędny eksport skutkuje nieprawidłowym oświetleniem i deformacją cieni, co pogarsza wizualny realizm sceny.

Propozycja rozwiązania – wewnętrzny konwerter osi

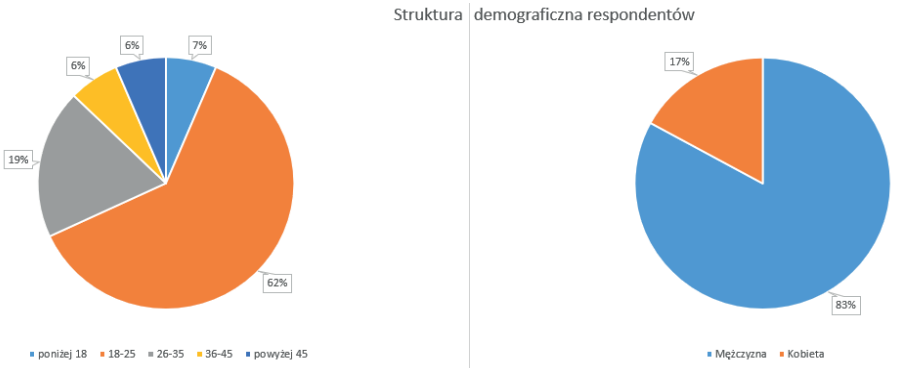
Aby wyeliminować błędy przy imporcie modeli 3D, opracowano koncepcję wewnętrznego konwertera osi w Unity. Narzędzie analizuje model po imporcie, automatycznie korygując jego rotację, skalę i położenie środka ciężkości. Dzięki temu obiekty z Blendera czy 3ds Max są od razu zgodne z układem współrzędnych Unity, a ich orientacja i punkt obrotu są poprawne, co zapewnia naturalne zachowanie podczas interakcji. Konwerter może także automatycznie dopasowywać skalę modeli i przeliczać jednostki, by zachować właściwe proporcje w środowisku XR. Dodatkowe funkcje, takie jak korekta normalnych, przypisywanie materiałów PBR oraz optymalizacja liczby wierzchołków i poziomów szczegółowości (LOD), usprawniają proces produkcji i gwarantują płynne renderowanie, co przekłada się na wyższy komfort użytkownika.

Wyniki badań ankietowych

Badanie ankietowe przeprowadzono wśród 46 uczestników (studentów i pracowników Akademii Bialskiej), których celem było określenie subiektywnego poziomu komfortu, precyzji oraz ergonomii interakcji 3D w środowiskach VR. Respondenci oceniali m.in. swoje doświadczenie z technologią VR, poziom komfortu fizycznego, występowanie objawów choroby symulatorowej oraz ogólną ocenę jakości interakcji.

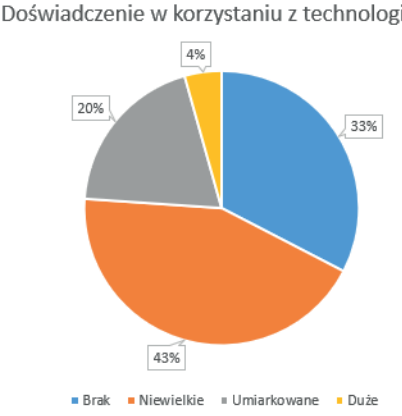
Charakterystyka respondentów

Większość uczestników stanowiły osoby w wieku 18-25 lat (62%), a kolejna znacząca grupa to użytkownicy w wieku 26-35 lat (19%). Nieliczni respondenci znajdowali się w przedziale 36-45 lat (6%) oraz powyżej 45 lat (6%). Struktura płci wskazuje na przewagę mężczyzn (83%) przy 17% kobiet (rysunek 5).



Rysunek 5. Struktura wieku i płci uczestników badania
Źródło: opracowanie własne.

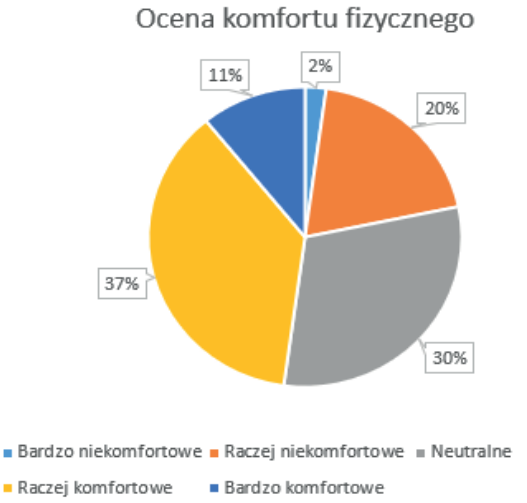
Pod względem doświadczenia w korzystaniu z technologii VR, 43% badanych zadeklarowało niewielkie doświadczenie, 33% – brak wcześniejszego kontaktu z VR, a tylko 4% określiło swoje doświadczenie jako duże. Wskazuje to, że większość uczestników reprezentowała grupę początkujących użytkowników (rysunek 6).



Rysunek 6. Poziom doświadczenia użytkowników w technologii VR
Źródło: opracowanie własne.

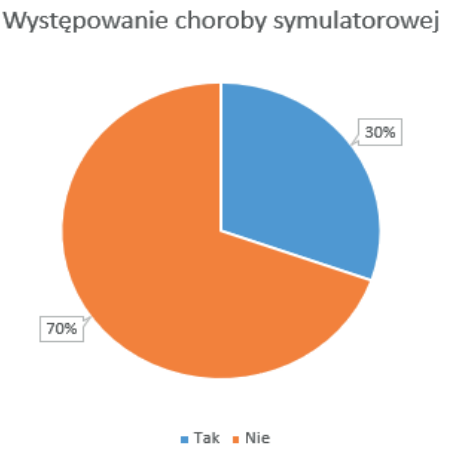
Komfort fizyczny i choroba symulatorowa

W ocenie komfortu fizycznego podczas dłuższego korzystania z aplikacji VR, 37% respondentów uznało środowisko za raczej komfortowe, a 11% – za bardzo komfortowe. 30% określiło swoje odczucia jako neutralne, natomiast 20% wskazało na raczej niekomfortowe doświadczenie (rysunek 7).



Rysunek 7. Ocena komfortu fizycznego użytkowników podczas korzystania z aplikacji VR
Źródło: opracowanie własne.

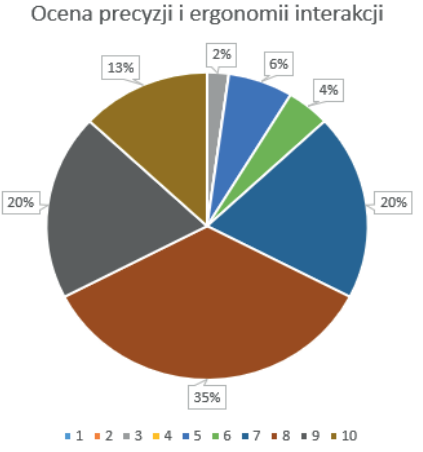
Objawy choroby symulatorowej (takie jak zawroty głowy, dezorientacja czy mdłości) zadeklarowało 30% uczestników, podczas gdy 70% nie doświadczyło tego typu problemów (rysunek 8). Wynik ten potwierdza, że współczesne urządzenia, takie jak Meta Quest 3 i HoloLens 2, znacząco redukują efekt motion sickness, choć nie eliminują go całkowicie.



Rysunek 8. Odsetek użytkowników doświadczających objawów choroby symulatorowej
Źródło: opracowanie własne.

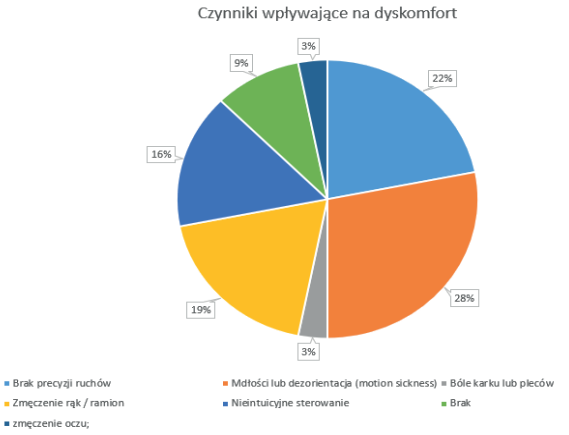
Precyzja i ergonomia interakcji

Średnia ocena precyzji i ergonomii interakcji 3D wyniosła 7,9/10, przy odchyleniu standardowym 1,5. Wynik ten wskazuje na wysoki poziom satysfakcji użytkowników, przy czym 50% respondentów oceniło interakcje na poziomie 8 punktów lub wyżej, a maksymalna ocena wyniosła 10 (rysunek 9).



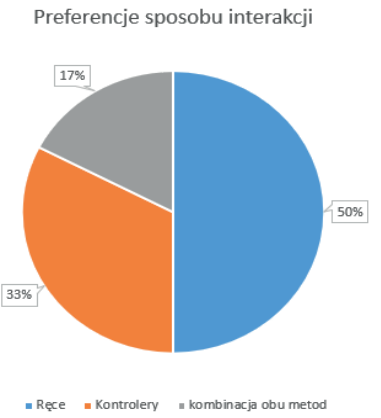
Rysunek 9. Rozkład ocen precyzji i ergonomii interakcji 3D
Źródło: opracowanie własne.

Najczęściej zgłaszanym problemem podczas korzystania z VR były mdłości i dezorientacja (28%), co potwierdza nadal występujący efekt choroby symulatorowej. Brak precyzji ruchów (22%) oraz zmęczenie rąk i ramion (19%) wskazują na ograniczenia ergonomii oraz dokładności śledzenia dłoni (rysunek 10). Nieintuicyjne sterowanie zgłosiło 16% użytkowników, natomiast bóle karku i pleców pojawiły się u 9% badanych. Tylko 3% osób nie odczuło żadnych problemów.



Rysunek 10. Czynniki najczęściej powodujące dyskomfort w środowisku VR
Źródło: opracowanie własne.

Większość użytkowników preferowała interakcję przy użyciu rąk (hand tracking) zamiast kontrolerów (rysunek 11), co potwierdza potrzebę dalszej optymalizacji algorytmów śledzenia dłoni w środowisku Unity oraz lepszego dopasowania interfejsu do fizjologicznego zasięgu ruchu użytkownika.



Rysunek 11. Preferowany sposób interakcji w środowisku VR
Źródło: opracowanie własne.

Dyskusja

Analiza z wykorzystaniem Meta Quest 3 wykazała, że efektywność interakcji 3D zależy od połączenia ergonomii gestów, precyzji śledzenia i jakości potoku technicznego. Nawet drobne zaniedbania w tych obszarach prowadzą do utraty immersji lub dyskomfortu użytkownika. Z punktu widzenia ergonomii kluczowe jest utrzymanie naturalnej postawy – ręce powinny spoczywać w neutralnej pozycji, a mechanizmy wielopunktowego chwytu i automatycznego przyciągania dłoni zmniejszają zmęczenie. Precyzję interakcji determinują stabilność śledzenia i jakość algorytmów predykcyjnych; kontrolery z sensorami inercyjnymi są dokładniejsze niż systemy oparte na kamerach, które wciąż mają problemy przy szybkim ruchu i zmiennym oświetleniu. Od strony technicznej wydajność potoku 3D ma duże znaczenie – błędne osie obrotu lub zbyt złożone modele obniżają liczbę klatek i realizm sceny. Automatyczny konwerter osi i skali w Unity zapewnia spójność modeli między środowiskami, usprawniając integrację i poprawiając jakość doświadczenia XR.

Wnioski

Badania ankietowe i analiza porównawcza interakcji w HoloLens 2 oraz Meta Quest 3 potwierdziły, że ergonomia i precyzja są kluczowe dla jakości doświadczenia immersyjnego. Użytkownicy wysoko ocenili komfort i naturalność interakcji (średnio 7,9/10), choć część z nich wskazała na zmęczenie przy dłuższym użytkowaniu. Około 30% badanych doświadczyło objawów choroby symulatorowej, co pokazuje, że latencja i stabilność obrazu nadal mają duży wpływ na komfort.

Najbardziej preferowaną metodą sterowania okazał się *hand tracking*, uznawany za naturalny, lecz mniej precyzyjny przy manipulacji małymi obiektami, co wskazuje na potrzebę dalszego rozwoju algorytmów predykcyjnych i filtrów ruchu. Z ergonomicznego punktu widzenia kluczowa pozostaje kalibracja postawy i dynamiczne dopasowanie strefy interakcji do wzrostu, a także wykorzystanie wielokanałowego sprzężenia zwrotnego – wizualnego, dźwiękowego i haptycznego.

Badania wykazały również znaczenie poprawnego potoku 3D – błędna orientacja modeli, skala czy punkty obrotu mogą zaburzać realizm interakcji. Wewnętrzny konwerter osi w Unity skutecznie eliminuje te błędy, zapewniając spójność modeli między środowiskami.

Podsumowując, wysoka jakość interakcji XR wymaga równoczesnej optymalizacji aspektów ergonomicznych i technicznych. Dalszy rozwój powinien koncentrować się na redukcji opóźnień, ulepszeniu śledzenia dłoni i wprowadzeniu adaptacyjnych mechanizmów dostosowujących interfejs do użytkownika, co pozwoli uczynić VR i MR środowiskami w pełni naturalnymi i komfortowymi.

Niniejsza praca stanowi empirycznie ugruntowaną podstawę do opracowania kompleksowej metodologii projektowania aplikacji XR o wysokiej ergonomii i precyzji, umożliwiając w przyszłości standaryzację procesu tworzenia naturalnych, transparentnych interfejsów użytkownika w środowiskach wirtualnej i mieszanej rzeczywistości.

Literatura

1. Bazargani, J. S., Choi, S.-M. (2025). *Multi-modal Interaction with Virtual Agents: A Pick-up and Placement Case Study.* IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces. https://doi.org/10.1109/VRW66409.2025.00336
2. Chen, Y., Wu, Z. (2022). A review on ergonomics evaluations of virtual reality. *WORK: A Journal of Prevention, Assessment & Rehabilitation*, *74*(3), 831-841. https://doi.org/10.3233/WOR-205232
3. Ferrari, V., Condino, S., Nocera, A. (2023). *Proof of Concept of Using HoloLens 2 for AR Immersive Training in Complex Medical Scenarios.* IEEE International Conference on Metrology for eXtended Reality, Artificial Intelligence and Neural Engineering.
4. Han, S. Y., Kim, Y., Lee, S. H., Cho, N. I. (2019). *Pupil Center Detection Based on the UNet for the User Interaction in VR and AR Environments.* IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces.
5. Kim, H., Park, J.-H. (2014). *DuplicateSpace: Enhancing Operability of Virtual 3D Objects by Asymmetric Bimanual Interaction.* IEEE International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence.
6. Lysenko, S., Kachur, K. (2023). *Challenges Towards VR Technology: VR Architecture Optimization*. IEEE VR.
7. Miller, N., Willemsen, P., Feyen, R. G. (2018). *Comparing Interface Affordances for Controlling a Push Broom in VR.* IEEE VR.
8. Pakkanen, T., Hakulinen, J., Jokela, T., Rakkolainen, I. (2017). *Interaction with WebVR 360 Video Player: Comparing Three Interaction Paradigms.* IEEE Virtual Reality.
9. Pohl, D., Choudhury, N., Achtelik, M. (2018) *Concept for Rendering Optimizations for Full Human Field of View HMDs*. IEEE VR.
10. Sanders, N., Sener, E., Chen, K. B. (2023). Eliciting Ergonomic User-Defined Gestures for Virtual Reality: A Pilot Study. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 67*(1), 1510-1515. https://doi.org/10.1177/21695067231192530
11. Souchet, A. D., Lourdeaux, D., Pagani, A., Rebenitsch, L. (2022). A narrative review of immersive virtual reality's ergonomics and risks at the workplace: cybersickness, visual fatigue, muscular fatigue, acute stress, and mental overload. *Virtual Reality, 27*(1). https://doi.org/10.1007/s10055-022-00672-0

12. Steed, A., Lai, J. (2025). Comparison of hand tracking-based and controller-based interaction in a consumer virtual reality game. *Virtual Reality, 29*(3). https://doi.org/10.1007/s10055-025-01190-5
13. Tian, H., Chanabo, W., Zhana, X. (2018). *A Realtime Virtual Grasping System for Manipulating Complex Objects*. IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces, Reutlingen, Germany.
14. Tian, H., Wang, C., Manocha, D., Zhang, X. (2019). Realtime Hand-Object Interaction Using Learned Grasp Space for Virtual Environments. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 25*(8), 2623-2635. https://doi.org/10.1109/tvcg.2018.2849381
15. Tütüncü, E. K., Gonzalez-Franco, M., Gonzalez, E. J. (2025). *HandOver: Enabling Precise Selection & Manipulation of 3D Objects with Mouse and Hand Tracking*. Proceedings of the 38th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, 1-11. https://doi.org/10.1145/3746059.3747757
16. Wang, K., Gao, Y., Song, W., Li, Y., Hao, A. (2024). *Gaze Pattern Genius: Gaze-Driven VR Interaction Using Unsupervised Domain Adaptation.* IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces.
17. 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

Netografia

1. Purdue University. (2017). *Study on "gorilla arm"*. Pobrane z: https://www.purdue.edu/newsroom/archive/releases/2017/Q2/study-researches-gorilla-arm-fatigue-in-mid-air-computer-usage.html (data dostępu: 10.11.2025).
2. Wired. (2013). *John Carmack on latency*. Pobrane z: https://www.wired.com/2013/02/john-carmacks-latency-mitigation-strategies/ (data dostępu: 10.11.2025).