

Klaudia PRONIEWSKA



Obrazowanie 3D oraz technologie IMMERSYJNE w medycynie

Edukacja medyczna i zastosowanie kliniczne

Klaudia PRONIEWSKA

Obrazowanie 3D oraz technologie IMMERSYJNE w medycynie

Edukacja medyczna i zastosowanie kliniczne



Klaudia PRONIEWSKA

Obrazowanie 3D oraz technologie IMMERSYJNE w medycynie

Edukacja medyczna i zastosowanie kliniczne

HOLOMED. OBRAZOWANIE 3D ORAZ TECHNOLOGIE IMMERSYJNE
W MEDYCYNIE: EDUKACJA MEDYCZNA I ZASTOSOWANIE KLINICZNE

Autor: Klaudia Proniewska

Redaktor zarządzający: Jacek Kujawa

Redakcja i korekta: Dominika Surma @pani.redaktorka

Skład i łamanie: Kachna Kraśnianka @kachna.krasnianka

Wydawca: Fundacja Uciekamycukrzycy, Unii Brzeskiej 3/2,
38-600 Lesko @uciekamycukrzycy

ISBN 978-83-972187-0-3

Wydanie I

WSTĘP OD AUTORA

W edukacji medycznej i zastosowaniu nowych technologii w medycynie najważniejsze jest zapewnienie, aby studenci kierunków medycznych oraz personel medyczny byli wyposażeni w praktyczne umiejętności bezpiecznego i skutecznego wykorzystania ich w codziennej praktyce. W tym miejscu wkracza technologia immersyjna, obiecując nie tylko uzupełnienie, ale potencjalnie zrewolucjonizowanie tradycyjnych ścieżek szkolenia medycznego.

Dzięki technologiom immersyjnym studenci oraz kadra medyczna przechodzą od zwykłego słuchacza bądź nauczyciela do aktywnych uczestników bogatego, wciągającego doświadczenia sytuacyjnego. Ta przełomowa technologia zapewnia praktyczne szkolenie w kontrolowanym, wolnym od ryzyka środowisku. Studenci medycyny mogą uczyć się anatomii człowieka oraz ćwiczyć procedury medyczne, na przykład wprowadzanie linii centralnej, intubację czy wszczepienie zastawki aortalnej. Możliwe jest również tworzenie różnych symulacji wysokiej wierności, takich jak symulacje katastrof czy postępowania na Szpitalnym Oddziale Ratunkowym. Unikalną cechą symulacji w technologiach immersyjnych jest ich realistyczne odzwierciedlenie w świecie rzeczywistym i zintegrowane mechanizmy sprzężenia zwrotnego. Gdy uczestnicy poruszają się po tych symulowanych procedurach, system zapewnia

informacje zwrotne w czasie rzeczywistym, umożliwiając im doskonalenie technik i korygowanie błędów na miejscu. Takie natychmiastowe informacje zwrotne o wynikach mogą również służyć jako wskaźnik oceny, zapewniając nauczycielom wgląd w kompetencje i postępy uczniów. Poza rozwojem umiejętności technologia immersyjna odgrywa kluczową rolę w budowaniu pewności siebie, zapewniając, że studenci oraz kadra medyczna są zarówno wykwalifikowani technicznie, jak i przygotowani psychicznie, gdy przechodzą do rzeczywistych scenariuszy klinicznych.

Aby potwierdzić skuteczność technologii immersyjnych w edukacji medycznej oraz zastosowaniu klinicznym, stworzyłam laboratorium technologii immersyjnych przy Uniwersytecie Jagiellońskim Collegium Medicum w Centrum Medycyny Cyfrowej i Robotyki, gdzie kieruję międzynarodowym oraz interdyscyplinarnym zespołem pracującym nad tworzeniem aplikacji przeznaczonych do edukacji studentów kierunków medycznych oraz testów wdrożeń zastosowań klinicznych. Wiązało się to z prezentacją przypadków klinicznych opracowanych przy użyciu technologii immersyjnych wybranym specjalistom medycznym z UJCM oraz wiodących europejskich ośrodków badawczych, takich jak Radboud University Medical Center czy Gemelli IRCCS Università Cattolica del Sacro Cuore. Specjaliści ci, wcześniej niezaznajomieni z technologią, przedstawili swoje spostrzeżenia, które zostały zebrane dzięki szczegółowym ankietom.

Zagłębiając się w tło, technologie immersyjne, takie jak mieszana rzeczywistość (MR), rzeczywistość wirtualna (VR) i rzeczywistość rozszerzona (AR), stworzyły dla siebie niszę w różnych branżach, w tym w medycynie. Chociaż potencjał transformacyjny tych technologii jest oczywisty, ich bezproblemowa integracja wymaga od użytkowników przystosowania się do trójwymiarowych środowisk wirtualnych i otrzymania odpowiednich instrukcji.

W naszym podejściu empirycznym przeprowadziliśmy szereg szkoleń i testów technologii immersyjnych. Celem było rozpoznanie dostrzeżonego potencjału włączenia ich do programu nauczania medycyny oraz planowania klinicznego.

Chociaż rola technologii immersyjnych w edukacji medycznej oraz zastosowaniu klinicznym jest oczywista i nieoceniona, jej pełny potencjał można wykorzystać tylko wtedy, gdy jej dostępność zostanie poszerzona. Niedawna pandemia uwypukliła znaczenie zdalnego nauczania oraz pracy, a technologia immersyjna może być otwarciem granicy w tej dziedzinie, zapewniając solidną i wciągającą edukację medyczną oraz wsparcie technologiczne niezależnie od ograniczeń geograficznych. Technologia ta oferuje coś więcej niż tylko innowacyjny proces nauczania czy wizualizacje trójwymiarowe struktur anatomicznych na potrzeby planowania przedproceduralnego, obiecuje niezrównane doświadczenie wspólnotowe, sprzyjając bogatej wymianie wiedzy w środowisku medycznym i poza nim.

Rzeczywistość immersyjna rozszerza elementy rzeczywistości wirtualnej na naturalną obserwację otoczenia ludzkim wzrokiem, tworząc interaktywną mieszaną rzeczywistość (Mixed Reality). Wykorzystując urządzenia montowane na głowie, na przykład z przezroczystymi ekranami, wyświetla obrazy, dzięki czemu bezproblemowo integrują się z naturalną percepcją użytkowników. Ta ewolucja technologiczna może być szczególnie przełomowa dla medycznych profesjonalistów. W przeciwieństwie do tradycyjnych metod, takich jak przeglądanie papierowych wykresów lub stałych ekranów, technologia immersyjna oferuje natychmiastowy dostęp do obrazów i danych. Ma potencjał, aby zrewolucjonizować interakcje lekarz–pacjent poprzez wyświetlanie ważnych informacji na kartach medycznych, a nawet na samych pacjentach. Zatem zanurzymy się w niesamowitym świecie przestrzennych wizualizacji 3D.

Klaudia Proniewska



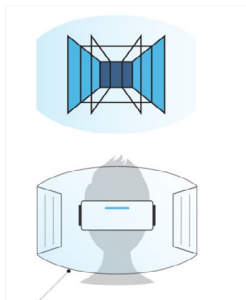
WSTĘP DO TECHNOLOGII IMMERSYJNYCH

1.1. Definicja i historia technologii immersyjnych

Technologie immersyjne (rys. 1), takie jak rzeczywistość wirtualna (Virtual Reality, VR), rzeczywistość rozszerzona (Augmented Reality, AR), rzeczywistość mieszana (Mixed Reality, MR), mogą mieć transformacyjny wpływ na opiekę zdrowotną, zarówno w sferze psychicznej, jak i fizycznej. Przykłady obszarów, w których wykazano pozytywny wpływ technologii immersyjnych, obejmują między innymi edukację medyczną, szkolenie pracowników służby zdrowia, rehabilitację, chirurgię, komunikację i telemedycynę [1].

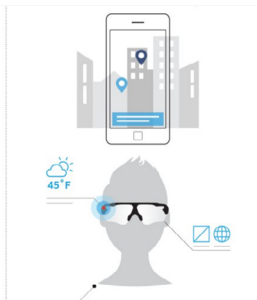
Przyjrzyjmy się różnicom pomiędzy technologiami immersyjnymi. Technologia, która rewolucjonizuje teraźniejszość i przyszłość, to nic innego jak technologie wciągające. Technologie immersyjne obejmujące

WIRTUALNA RZECZYWISTOŚĆ (VR)



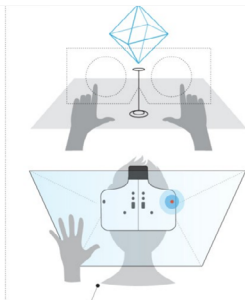
Całkowicie cyfrowe środowisko.
Całkowicie zamknięte,
syntetyczne doświadczenie bez
poczucia rzeczywistego świata.

ROZSZERZONA RZECZYWISTOŚĆ (AR)



Rzeczywisty świat z nakładką
informacyjną.
Rzeczywisty świat pozostaje
centralnym elementem
doświadczenia, wzbogaconym o
szczegóły wirtualne.

RZECZYWISTOŚĆ MIESZANA (MR)



Rzeczywisty i wirtualny świat są ze
sobą splecione.
Interakcja i manipulacja zarówno
fizycznym, jak i wirtualnym
środowiskiem.

Rys. 1. Różnice technologii immersyjnych: wirtualna rzeczywistość vs rozszerzona rzeczywistość vs rzeczywistość mieszana.

rzeczywistość wirtualną, rzeczywistość rozszerzoną i rzeczywistość mieszaną należą obecnie do najszybciej rozwijających się i najbardziej fascynujących technologii. Czym zatem jest technologia immersyjna? Krótko mówiąc, technologie immersyjne tworzą lub rozszerzają rzeczywistość, a dzieje się to poprzez zanurzenie użytkownika w środowisku cyfrowym mającym zastosowania w różnych dziedzinach. Technologia ta nabiera tempa z każdym dniem, przekształcając się i pomagając nam na nowo wyobrazić sobie przyszłość.

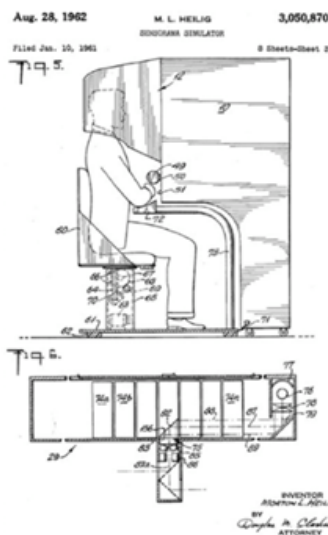
1.2. Wirtualna rzeczywistość

Wirtualna rzeczywistość wykorzystuje dedykowane środowisko programistyczne oraz urządzenia, takie jak gogle i kontrolery, do tworzenia symulowanego środowiska, pomagając jednostce zanurzyć się w nim

i doświadczyć zupełnie innej rzeczywistości. Jednak historia wirtualnej rzeczywistości rozpoczęła się już w XIX wieku. Ten pomysł ewoluował od czasów, gdy pojawiła się fotografia. Morton Heilig wynalazł pierwsze urządzenie VR, zwane Sensorama, w 1962 roku (rys. 2) [2]. Sensorama była maszyną, która jest jednym z najwcześniejszych znanych przykładów immersyjnej, wielozmysłowej (obecnie znanej jako multimodalnej) technologii. Ta technologia, wprowadzona w 1962 roku przez Mortona Heiliga, jest uważana za jeden z najwcześniejszych systemów rzeczywistości wirtualnej (VR). Sensorama z amerykańskiego patentu nr 3050870 [3]. Urządzenie multimedialne Sensorama jest uznawane za jeden z najwcześniejszych systemów VR. Jednak termin „rzeczywistość wirtualna” został ukuty później przez Jarona Laniera w 1987 roku podczas intensywnych badań nad tą rozwijającą się technologią [4].

Wiele firm inwestuje miliardy dolarów w sektor wirtualnej rzeczywistości. Do najlepszych produktów VR należą Oculus Meta Quest 3, Nintendo Labo VR Kit, Sony PlayStation VR, Lenovo Mirage i wiele innych. Gadżety te pozwalają zanurzyć się w środowisku cyfrowym i doświadczyć świata innego niż rzeczywistość. Można by pomyśleć, że VR to przede wszystkim gry, prawda? Ale na tym potencjał VR się nie kończy. Rewolucjonizuje wiele innych branż, takich jak edukacja, wojsko, medycyna i sport, żeby wymienić tylko parę. Oto kilka przykładów VR w prawdziwym życiu.

Class VR to nowa, innowacyjna koncepcja w branży edukacyjnej, która wykorzystuje technologię VR w celu zwiększenia zaangażowania i zatrzymania wiedzy uczniów w każdym wieku. Class VR [5] wykorzystuje gogle VR z przyjaznym dla użytkownika interfejsem, zarówno dla uczniów, jak i nauczycieli, sterowaniem gestami i wbudowanymi zasobami edukacyjnymi.



Sensorama, the first virtual immersion system, the technical table and the pictures shown at the presentation of the experimental product.

Rys 2. Pierwsze urządzenie wirtualnej rzeczywistości. Sensorama [3] [2].

Facebook przedstawia nowy pomysł o nazwie Facebook Horizon [6], który jest stale rozwijającą się społecznością VR, w której możesz odkrywać, bawić się i tworzyć. Pomaga przeciwstawić się fizyce i rzeczywistości oraz doświadczyć niemożliwego.

Mamy też VR 360, czyli 360-stopniową symulację audiowizualną. Pozwala użytkownikowi rozglądać się w dowolnym kierunku i obserwować rzeczy w prawdziwym życiu. Możesz doświadczyć wszystkiego, od stania na szczycie piramidy po cieszenie się festiwalem Tomorrowland w domu. Czy to nie wspaniale?

Nie możemy zakończyć tematu, jeśli nie podkreślimy roli VR w grach. Świetnym podejściem do tej kwestii jest film „Ready Player One” Stevena Spielberga [7]. Akcja filmu rozgrywa się w roku 2045, kiedy świat stoi

na krawędzi chaosu i upadku, ale ludzie znaleźli wybawienie we wszechświecie wirtualnej rzeczywistości, gdzie niemożliwe stało się możliwe.

1.3. Rozszerzona rzeczywistość

Następna w kolejce będzie rzeczywistość rozszerzona (AR). Rzeczywistość rozszerzona to technologia, która wyświetla generowane komputerowo ulepszenia na rzeczywistości, pomagając nam wykonywać zadania lepiej i wydajniej. AR, będąca na pograniczu rzeczywistości i rzeczywistości wirtualnej, to metoda renderowania danych ze świata rzeczywistego i przedstawiania ich w sposób intuicyjny, tak aby elementy wirtualne w pewnym stopniu przypominały obecną rzeczywistość. Na tym rewolucja się nie kończy. Czy kiedykolwiek próbowałeś łapać Pokémony za pomocą Pokémon Go lub montować meble za pomocą aplikacji IKEA? Jest to możliwe dzięki technologii zwanej Rzeczywistością Rozszerzoną. Rzeczywistość rozszerzona cieszy się w ciągu ostatnich kilku lat ogromną popularnością, a rewolucja nieprędko się skończy. AR daje markom możliwość zapewnienia swoim klientom unikalnych doświadczeń, które mogą zadecydować o zakupie lub rezygnacji. Można pomyśleć, że AR to nowa technologia. Wręcz przeciwnie, istnieje już od kilkudziesięciu lat. Rzućmy okiem na historię AR. Ivan Sutherland opracował pierwszy gadżet rzeczywistości rozszerzonej (AR), znany jako „Sword of Damocles” (Miecz Damoklesa), w 1968 roku (rys. 3) [8]. Był to pierwszy system head-mounted display (HMD), który mógł wyświetlać zarówno rzeczywistość wirtualną (VR), jak i rozszerzoną (AR). Urządzenie było tak ciężkie, że musiało być zawieszone na suficie, co nadawało mu wygląd miecza wiszącego nad głową użytkownika, stąd jego nazwa.

Rys. 3. „Sword of Damocles”. System składał się z dwóch dużych lamp katodowych umieszczonych po bokach głowy użytkownika oraz luster, które wyświetlały obrazy przed oczami [9].



Generowane przez komputer grafiki były prostymi, trójwymiarowymi obrazami złożonymi z linii, które zmieniały się w zależności od ruchów głowy użytkownika. Sutherlandowi udało się stworzyć urządzenie, które mogło wyświetlać obrazy również na przezroczystych pryzmatach, umożliwiając jednocześnie widzenie rzeczywistych i wirtualnych obiektów, co czyniło je pierwszym systemem AR [9]. Od Pokémon Go po szkolenie przyszłych chirurgów rzeczywistość rozszerzona zaczyna dziś przenikać do wielu gałęzi przemysłu naszego społeczeństwa. Ale czym właściwie jest rzeczywistość rozszerzona?

Patrząc na najpopularniejsze zastosowania AR, na początek mamy aplikacje AR oparte na lokalizacji, takie jak Mapy Google, które umieszczają cyfrowe wskazówki na rzeczywistym świecie i pokazują, jak się poruszać. Następnie mamy Google Lens, kolejną aplikację usprawniającą wyszukiwanie. Dzięki Google Lens nie trzeba wpisywać zapytania, po

prostu otwiera się aplikację i kieruje się obiektyw aparatu na przedmiot, o którym chcemy się czegoś dowiedzieć. Następnie Google Lens identyfikuje obiekt i podaje opis oraz szczegóły na dany temat. Kolejnym przykładem są filtry Snapchata. To jeden z najlepszych przykładów AR, a jak wiadomo, Snapchat stał się trendem wśród młodszych pokoleń. Czy wiesz, że Mysterio nie mógłby oszukać Spider-Mana bez technologii AR? Ale dzięki swojemu zmysłowi pająka Spidey uniknął wszystkich dronów, zniszczył je i dał nam dobre zakończenie. Nawet Facebook ma plany zbudowania okularów AR do tworzenia trójwymiarowych map świata. [6] [10]. W innym wystąpieniu dodał, że AR ma potencjał, aby radykalnie zmienić nasze życie, podobnie jak smartfony, i że w przyszłości wiele fizycznych przedmiotów może zostać zastąpionych hologramami.

1.4. Mieszana Rzeczywistość

Następna w tej linii technologii immersyjnych jest mieszana rzeczywistość (MR). Jeśli rzeczywistość wirtualna i rzeczywistość rozszerzona zrobiły na tobie wrażenie, przygotuj się na to, co najlepsze z obu światów: czyli rzeczywistość mieszaną (MR). Mieszana rzeczywistość polega na łączeniu świata rzeczywistego z rzeczywistością wirtualną. W przeciwieństwie do rzeczywistości rozszerzonej użytkownicy mogą wchodzić w interakcję z obiektami wirtualnymi w rzeczywistości mieszanej. To, co kilka lat temu było prawie niemożliwe i ograniczało naszą wyobraźnię, jak interakcja z ulubionym superbohaterem Marvela, jest teraz możliwe dzięki technologii. Jeśli chodzi o rzeczywistość mieszaną (MR), można ją nazwać AR 2.0. Mimo że MR jest jeszcze na wczesnym etapie rozwoju, oczekuje się, że inwestycje w AR i MR osiągną cztery miliardy dolarów w najbliższym czasie [11]. Przyszłość MR wygląda obiecująco, z coraz

większym zaangażowaniem firm technologicznych i inwestorów, co sugeruje, że technologia ta stanie się bardziej dostępna dla konsumentów w nadchodzących latach [12]. [13] [14]. Microsoft HoloLens jest przykładem zaawansowanego zastosowania rzeczywistości mieszanej (MR), które pozwala użytkownikom na interakcję z hologramami w rzeczywistym otoczeniu. Technologia ta jest wykorzystywana w wielu dziedzinach, takich jak edukacja, szkolenia, medycyna oraz przemysł, oferując możliwości, które wcześniej były nieosiągalne. Przykłady obejmują szkolenia medyczne z wykorzystaniem modeli 3D anatomicznych, współpracę inżynierów nad projektami maszyn oraz wsparcie w diagnostyce i leczeniu pacjentów [15].

Inwestycje w technologii rzeczywistości mieszanej i rozszerzonej rosną, a przewiduje się, że w najbliższych latach będą one wynosić miliardy dolarów, co wskazuje na rosnące zainteresowanie i potencjał tych technologii [12]. Zastosowania MR są ogromne, a jego główne obszary zastosowań obejmują edukację, szkolenia, sport, opiekę zdrowotną, misje kosmiczne, a nawet budownictwo. Chociaż wiele przypadków użycia znajduje się w fazie testowania, pomysł ten nie jest w żadnym wypadku przesadzony. Najlepszym przykładem MR jest Microsoft HoloLens, czyli para inteligentnych okularów MR. Pozwala oglądać hologramy 3D, które płynnie wtapiają się w rzeczywiste środowisko. Możesz wchodzić w interakcje z tymi „ulepszonymi rękami” i uzyskiwać wszystkie potrzebne informacje.

Rozpoczynając od gier, kupowanie mebli przez medycynę po projektowanie budynków – technologie immersyjne podbijają świat. Jak myślisz, co będzie dalej?

2

ROZWIJANIE UMIEJĘTNOŚCI MEDYCZNYCH – MOŻLIWOŚCI TECHNOLOGII IMMERSYJNYCH

W dziedzinie edukacji i praktyki medycznej integracja technologii immersyjnych oferuje potencjał transformacyjny. Jedną z najbardziej przełomowych implementacji tej technologii jest stworzenie wirtualnego cyfrowego bliźniaka pacjenta. Ta cyfrowa reprezentacja, stworzona na podstawie rzeczywistych obrazowych badań medycznych, takich jak tomografia komputerowa (CT) i rezonans magnetyczny (MRI), dostarcza trójwymiarowego, interaktywnego modelu anatomii pacjenta. Tworzenie wirtualnego pacjenta to więcej niż tylko zadanie techniczne. To praktyczne narzędzie o ogromnym potencjale diagnostycznym, planowania leczenia, wykonania leczenia i oceny po leczeniu. Poprzez badanie i analizę tych szczegółowych modeli profesjonaliści medyczni uzyskują przestrzenne zrozumienie obrazowych danych medycznych pacjenta. Mogą przeglądać, zanurzać się i manipulować modelem 3D struktury anatomicznej z każdego możliwego kąta, co zapewnia kompleksowe zrozumienie, którego

tradycyjne obrazy dwuwymiarowe nie mogą dostarczyć. W przypadku procedur chirurgicznych, zwłaszcza tych skomplikowanych i zaawansowanych, wirtualny cyfrowy bliźniak w 3D pacjenta jest nieoceniony [16]. Chirurdzy mogą symulować i planować całą procedurę w dedykowanym środowisku cyfrowym w celu przygotowania się do zabiegu czy operacji. Ta faza przygotowawcza może być kluczowa w określeniu najskuteczniejszego i najbardziej optymalnego podejścia [17].

Ponadto w dziedzinie edukacji pacjentów to narzędzie może w przyszłości być niezbędne. Pacjenci, często przytłoczeni medyczną terminologią i nieznajomością skomplikowanych szczegółów anatomicznych, mogą wizualnie i interaktywnie zrozumieć swoje schorzenie oraz kolejne opcje i etapy leczenia. W celu oceny skuteczności i wykonalności wykorzystania technologii immersyjnych w symulacjach wirtualnych pacjentów przetestowaliśmy nasze rozwiązania.

Koncepcja tworzenia wirtualnych cyfrowych bliźniaków pacjenta za pomocą technologii immersyjnych to przełomowe podejście do poprawy diagnostyki, planowania leczenia i oceny opieki zdrowotnej. Ten spersonalizowany wirtualny pacjent, wygenerowany komputerowo na podstawie danych źródłowych pacjenta, może być dostępny za pomocą rozwiązań technologii immersyjnych łączących elementy świata rzeczywistego, rzeczywistości rozszerzonej i wirtualnej.

Podsumowując, stworzenie wirtualnego cyfrowego bliźniaka pacjenta za pomocą technologii immersyjnych rewolucjonizuje opiekę zdrowotną poprzez poprawę diagnostyki, planowanie leczenia i oceny wyników w interaktywny sposób. Oferuje korzyści, takie jak doskonalenie szkolenia, precyzyjne diagnozy i zaangażowanie pacjentów, wszystko to w ramach immersyjnego środowiska symulacji medycznej. Platformy wirtualnych cyfrowych bliźniaków pacjentów oparte na technologiach immersyjnych mają potencjał, aby stanowić potężne narzędzie w informowaniu

i promowaniu opieki zorientowanej na personalizację procesu diagnostyki i terapii pacjenta z uwzględnieniem jego edukacji. Tego typu platformy mogą dostarczyć pacjentom bardziej spersonalizowane i angażujące doświadczenie, pozwalając im lepiej zrozumieć swoje schorzenie, opcje leczenia i przewidywane wyniki. Ponadto platformy wirtualnych pacjentów mogą ułatwiać bardziej efektywną komunikację między pacjentami a jednostkami opieki zdrowotnej, co umożliwia bardziej skoncentrowane na pacjencie podejście do opieki. Pacjenci mogą korzystać z tych platform do dzielenia się swoimi doświadczeniami, obawami i preferencjami, podczas gdy jednostki opieki zdrowotnej mogą wykorzystywać platformę do zbierania opinii i dostosowywania planów leczenia do indywidualnych potrzeb każdego pacjenta. Jednak istnieją również wyzwania związane z wykorzystaniem platform wirtualnych pacjentów. Obejmują one obawy dotyczące dokładności i niezawodności technologii, a także potencjał dla błędów lub nieścisłości w danych użytych do stworzenia modelu wirtualnego pacjenta.

Obrazowanie medyczne stanowi podstawę decyzji o przeprowadzeniu operacji i jest kluczowe dla określenia, jak radykalny może być dany zabieg. Jednak wyzwanie, zwłaszcza dla młodszych specjalistów, polega na interpretacji dwuwymiarowego obrazu odcieni szarości, medycznych danych źródłowych w formacie DICOM [18] (ang. **Digital Imaging and Communications in Medicine**, to międzynarodowy standard służący do zarządzania, przechowywania, przesyłania, wyświetlania, pobierania, przetwarzania i drukowania obrazów medycznych oraz powiązanych informacji; standard ten jest powszechnie używany w radiologii, kardiologii, onkologii oraz wielu innych dziedzinach medycyny.) i tworzeniu trafnych ocen klinicznych. Wizualizacja trójwymiarowa poprawia ten proces, zmniejszając wysiłek umysłowy potrzebny do śledzenia struktur między przekrojami i odpowiedniego oglądania dokładnych

relacji przestrzennych między strukturami anatomicznymi pacjenta. Ta technologia może również poprawić doświadczenie pacjenta poprzez wizualizację strategii operacyjnej, umożliwiając lepsze zrozumienie danego zabiegu i jego konieczności oraz przyczyniając się do redukcji lęku przedoperacyjnego. Gogle w technologii mieszanej rzeczywistości, jak Microsoft HoloLens, stanowią przydatne narzędzie intraoperacyjne, zwłaszcza w przypadkach anatomii patologicznej u pacjenta. Operator zakłada gogle na głowę, dzięki czemu umożliwia wizualizację danych medycznych bez blokowania widzenia operatora lub naruszania pola sterylnego, jakim jest pole operacyjne w sali operacyjnej.

W ramach prac naukowych prowadzonych w moim zespole przygotowano i przetestowano wiele przypadków klinicznych z wykorzystaniem technologii immersyjnych. Poniżej kilka z nich.

PRZYKŁAD 1

Zastosowanie komputerowej rekonstrukcji żuchwy z użyciem przeszczepu kości biodrowej oraz mieszanej rzeczywistości

Autorzy przypadku klinicznego: Jan Zapała, Grażyna Wyszynska-Pawełec, Marcin Bober, Damian Dołęga-Dołęgowski, Klaudia Proniewska.

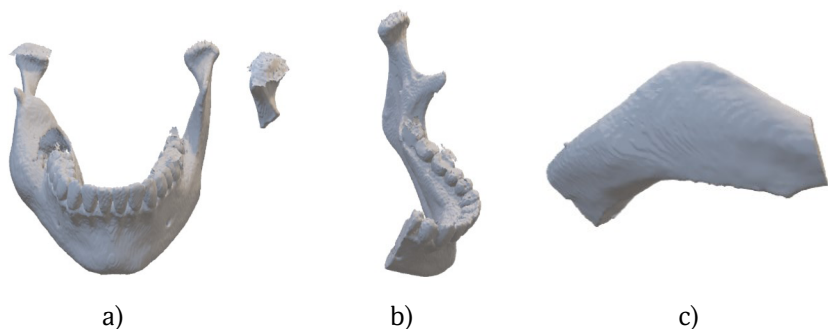
Komputerowo wspomagana rekonstrukcja żuchwy za pomocą przeszczepu kości biodrowej to procedura chirurgiczna powszechnie przeprowadzana w celu przywrócenia kości żuchwy w przypadkach, w których uległa ona uszkodzeniu lub została usunięta z powodu urazu, choroby lub operacji. Poniżej znajduje się ogólny opis studium przypadku oraz kroki kluczowe do wizualizacji w przestrzeni trójwymiarowej, które zostały przedstawione w ocenie przedoperacyjnej oraz śródoperacyjnej

przy użyciu technologii rzeczywistości mieszanej. Przed operacją pacjent przechodzi dokładną ocenę, obejmującą historię medyczną, badanie kliniczne i badania obrazowe (m.in. tomografia komputerowa), aby ocenić stopień utraty kości żuchwy i zaplanować rekonstrukcję. W tej procedurze zazwyczaj używa się kości biodrowej jako miejsca pobierania przeszczepu. Talerz biodrowy ograniczony jest przez grzebień biodrowy, który rozpoczyna się kolcem biodrowym przednim górnym, a kończy kolcem biodrowym tylnym górnym. Jest to powszechny wybór, ponieważ dostarcza odpowiednią ilość kości do rekonstrukcji. Pacjent jest poddawany znieczuleniu ogólnemu, aby upewnić się, że jest nieprzytomny. Pobieranie przeszczepu kości z przedniego grzebienia biodrowego polega na wykonaniu małego nacięcia w przedniej części miednicy, powyżej biodra. Kość jest pobierana od strony przyśrodkowej, czyli wewnętrznej, w kierunku linii środkowej ciała. Dostęp do tylnego grzebienia biodrowego umożliwia uzyskanie większej ilości kości, co jest korzystne w przypadku dużych rekonstrukcji, jednak jest to bardziej skomplikowane, ponieważ wymaga obrócenia pacjenta. Nacięcie wykonuje się głęboko w dolnej części pleców, na tej samej kości, z której pobiera się przeszczep przedni [19]. Chirurg dba o zachowanie naczyń krwionośnych i tkanki łącznej w tym obszarze. Zbierana kość jest następnie kształtowana i przygotowywana do przeszczepu. Często jest cięta i rzeźbiona, aby pasowała do kształtu i rozmiaru brakującej części żuchwy. Uszkodzona lub brakująca część żuchwy jest przygotowywana poprzez usunięcie pozostałej chorej tkanki i stworzenie odpowiedniego miejsca na przeszczep kostny. Przygotowany przeszczep kości biodrowej jest ostrożnie umieszczany i utrzymywany na miejscu za pomocą śrub, płyt lub innych urządzeń do stabilizacji. Chirurg zapewnia stabilne i precyzyjne dopasowanie, aby stymulować prawidłowe gojenie i integrację z istniejącą kością żuchwy. Po umocnieniu przeszczepu zarówno nacięcia

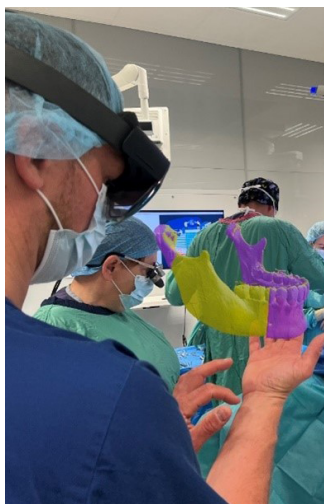
z dojsćcia do kości biodrowej, jak i w żuchwie są zamykane za pomocą szwów. Po operacji pacjent jest obserwowany w sali pooperacyjnej. Może być przepisane leczenie bólu, antybiotyki i inne leki w miarę potrzeb. Pacjenci przechodzą okres gojenia i rehabilitacji. Może to obejmować ograniczenia dietetyczne, terapię fizyczną i regularne wizyty kontrolne w celu monitorowania postępu zrostu kości i ogólnego gojenia się. Zastosowanie technik komputerowego wspomaganie może obejmować wykorzystanie zaawansowanych technologii, takich jak obrazowanie 3D, projektowanie wspomagane komputerowo (CAD) i systemy nawigacyjne w celu poprawy precyzji i wyników procedury.

Biorąc pod uwagę poziom skomplikowania procedury chirurgicznej i wykorzystując nowoczesne techniki wizualizacji, możemy usprawnić ten proces poprzez przedoperacyjne planowanie oraz śródoperacyjną integrację rzeczywistości z wirtualnym obiektem. Trójwymiarowy model wycinka, który powinien zostać pobrany podczas procedury, zostaje przygotowany w procesie segmentacji, czyli wyodrębnienia danej struktury anatomicznej, i wyeksportowany do formatu danych przestrzennych (rys. 4). Operator/lekarz, mając gogle na głowie, nakłada wirtualny model na biodro pacjenta, manipulując ułożeniem modelu pod odpowiednim kątem, tak aby dokładnie dopasować model wirtualny do kształtu kości biodrowej. Aby zautomatyzować taki proces, na podstawie tomografii komputerowej biodra dobieramy punkty odniesienia, tzw. znaczniki/markery, które odzwierciedlają współrzędne położenia danej struktury. Poprzez automatyczne mapowanie wycinka biodra, mając tomografię komputerową wraz ze znacznikami współrzędnych przestrzennych, możemy wymusić na goglach, aby automatycznie rozpoznawały pozycję i miejsce, gdzie znajduje się biodro pacjenta, po czym w odpowiednim miejscu wyświetlały/nakładały oczekiwany model. Możemy wtedy wykorzystać taką technikę do odpowiedniego ustawienia biodra pacjenta,

gdyż przed pierwszym cięciem operator widzi „prześwietlenie” bioder pacjenta wraz z zaznaczeniem fragmentu do wycięcia (rys. 5). Ważna jest również weryfikacja poprawności modelu względem naturalnej struktury anatomicznej pacjenta [20]. Aby sprawdzić poprawność wirtualnego modelu 3D względem naturalnej struktury anatomicznej pacjenta, należy przeprowadzić następujące kroki: nałożyć model 3D na obrazy z tomografii komputerowej (CT) lub rezonansu magnetycznego (MRI) i porównaj go wizualnie w różnych płaszczyznach (osiowej, czołowej, strzałkowej); porównaj kluczowe odległości, kąty oraz kształt struktur anatomicznych; oznacz punkty orientacyjne na obu zestawach danych i sprawdź ich pokrywanie; wykorzystaj algorytmy rejestracji obrazów do dopasowania modelu do obrazów anatomicznych; skonsultuj zgodność modelu z radiologiem lub chirurgiem; przeprowadź symulacje biomechaniczne oceniające zachowanie modelu pod obciążeniem; użyj oprogramowania specjalistycznego z wbudowanymi narzędziami walidacyjnymi. Każdy z tych kroków dostarczy informacji o zgodności modelu z anatomią pacjenta i pomoże zidentyfikować ewentualne nieścisłości.



Rys. 4. Modele 3D kości jako części procesu planowania przedoperacyjnego: a) żuchwa z nowotworem, b) wirtualnie reprezentacja usuniętego fragmentu żuchwy, bez nowotworu, c) wirtualny fragment kości biodrowej dopasowany do usuniętego fragmentu żuchwy.



Rys. 5. Śródoperacyjna ocena i dopasowanie przygotowanych wirtualnych modeli do struktur anatomicznych pacjenta.

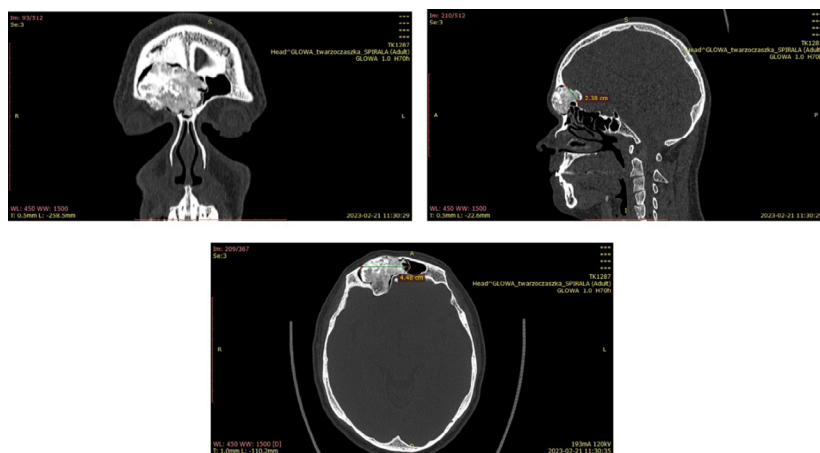
■ PRZYKŁAD 2

|| Zastosowanie okularów rzeczywistości mieszanej HoloLens 2
|| w ocenie przedoperacyjnej guza zatoki czołowej

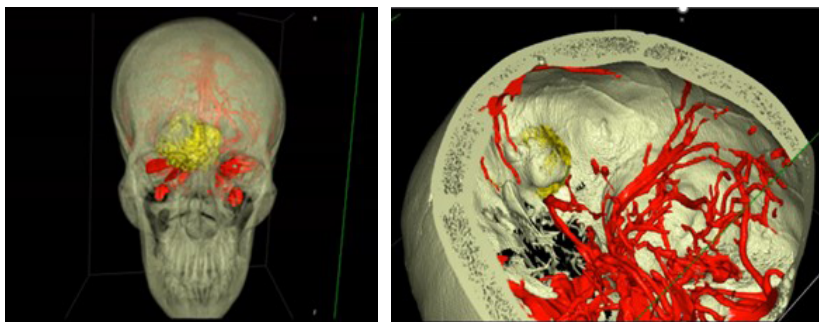
Autorzy przypadku klinicznego: Joanna Cieślik, Paweł Dobosz, Paweł Ozga, Jerzy Tomik, Damian Dołęga-Dołęgowski, Klaudia Proniewska.

Wykorzystanie okularów rzeczywistości mieszanej Microsoft HoloLens 2 w ocenie przedoperacyjnej guza zatoki czołowej stanowi innowacyjne i nowatorskie podejście w tej dziedzinie. W sytuacji zdiagnozowania guza w zatoce czołowej, co jest szczególnie trudnym obszarem do operacji ze względu na bliskość do struktur krytycznych, takich jak mózg i oczy, pacjent poddawany jest dokładnej ocenie za pomocą technik obrazowania medycznego, takich jak tomografia komputerowa,

rezonans magnetyczny oraz inne badania diagnostyczne, aby precyzyjnie zmapować lokalizację guza, jego wielkość oraz relacje z pobliskimi strukturami anatomicznymi. Dane z tych badań, obejmujące obrazowanie źródłowe oraz modele trójwymiarowe zatoki czołowej pacjenta i guza (rys. 6), są przetwarzane i konwertowane na format cyfrowy, kompatybilny z okularami HoloLens 2 (rys.7). Dane z obrazowania medycznego pacjenta są przesyłane do HoloLens 2, tworząc holograficzną reprezentację 3D zatoki czołowej i guza. To pozwala na immersyjną i dokładną wizualizację guza oraz otaczających struktur, umożliwiając precyzyjne planowanie podejścia chirurgicznego. Chirurg może ocenić lokalizację guza w stosunku do struktur krytycznych i zaplanować najbezpieczniejszą i najbardziej efektywną trasę jego usunięcia. Dodatkowo, możliwość symulacji różnych scenariuszy i oceny potencjalnych komplikacji pomaga zmniejszyć ryzyko związane z operacją. Wprowadzenie okularów rzeczywistości mieszanej HoloLens 2 do oceny przedoperacyjnej guza zatoki czołowej nie tylko może poprawić precyzję i bezpieczeństwo operacji, ale także stanowi istotny postęp w technologii medycznej.



Rys. 6. Dane źródłowe w formacie DICOM.



Rys. 7. Wizualizacja guza w zatoce czołowej.

PRZYKŁAD 3

Nawracające dekomensacje układu krążenia i utrata
świadomości

Autorzy przypadku: Tomasz Tokarek, Klaudia Proniewska.

Pacjent, 85-letni mężczyzna, został przyjęty na oddział ratunkowy szpitala. Skarżył się na duszność wysiłkową (podczas wchodzenia na pierwsze piętro, mycia i ubierania się) oraz okresowe duszności w spoczynku. Duszność pojawiała się także przy schylaniu. Pacjent zgłaszał zawroty głowy i szumy uszne, a w ostatnim czasie miał dwa epizody omdlenia. Dodatkowo wystąpiły u niego obrzęki kończyn dolnych i bóle pleców. Klasyfikacja NYHA wynosiła III/IV, a CCS II. Przeprowadzono ocenę ryzyka okołoperacyjnego i kwalifikację przez Heart Team [21], czyli zespół lekarzy odpowiedzialnych za decyzje dotyczące strategii diagnostyczno-terapeutycznej. Na podstawie obrazowych danych źródłowych stworzono wizualizację 3D. Podjęto decyzję o konieczności przeprowadzenia procedury oraz jej rodzaju. Pacjent został zakwalifikowany do TAVI (ang. Transcatheter aortic valve implantation, pol. przezcewnikowe wszczepienie

zastawki aortalnej). W badaniu angioCT (tomografii komputerowej naczyń) stwierdzono porcelanową aortę, zwężoną tętnicę biodrową prawą, stan po CABG (rewaskularyzacji mięśnia sercowego) oraz POChP (przewlekłą obturacyjną chorobę płuc). Wybrano tętnice udowe lewe jako dostęp operacyjny. Ponadto, reBAV (powtarzająca się zastawka aortalna dwudzielna) nie była możliwa do naprawienia ze względu na umiarkowane wypadanie zastawki. Wymiana zastawki aortalnej (AVR) również była wykluczona z powodu stanu po CABG, porcelanowej aorty oraz wysokiego ryzyka operacyjnego. Materiał ten został wykorzystany do celów edukacyjnych podczas zajęć dydaktycznych w UJCM. Poszczególne etapy procesu diagnostycznego z wykorzystaniem technologii immersyjnej zostały przedstawione na rycinie (rys. 8) [21].

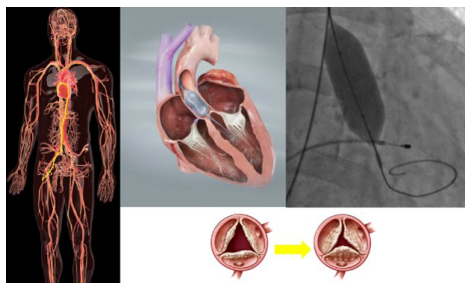
PRZYKŁAD 4

Innowacyjne podejście do elektro-anatomicznego
obrazowania serca w 3D z wykorzystaniem rzeczywistości
mieszanej

Autorzy przypadku klinicznego: Paweł Matusik, Klaudia Proniewska, Peter van Dam.

Wraz ze wzrostem jakości i rozdzielczości w obrazowaniu medycznym, rekonstrukcja 3D organów staje się osiągalna zarówno w celach klinicznych, jak i edukacyjnych. Obrazowanie medyczne dostarcza wiele wido-
ków 2D (DICOM) serca w 3D, pozostawiając interpretację przestrzenną ekspertom medycznym. Szczegółowe modele anatomiczne w połączeniu z wyznaczoną na podstawie EKG średnią pozycją aktywności elektrycznej serca w czasie, PathECG [22], dostarczają nowego funkcjonalnego

A)



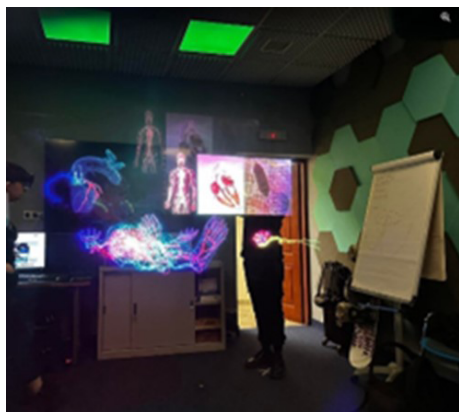
B)



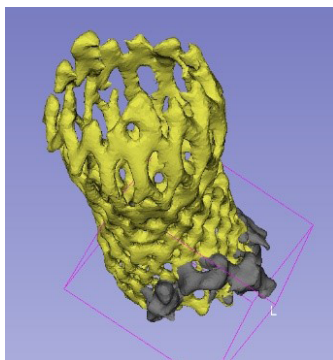
C)



E)



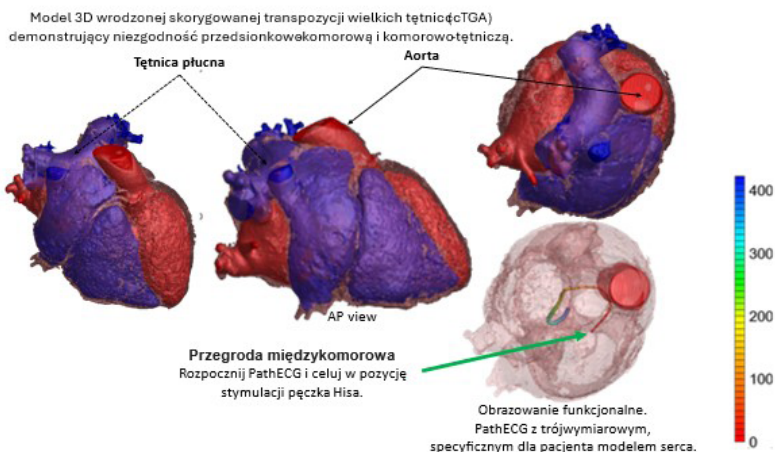
D)



Rys. 8. A) Wizualizacja zastawki aortalnej z przestrzennym układem narządów w odniesieniu do obrazowaniem serca B) Schemat umiejscowienia zastawki TAVI. C) Model 3D serca oparty na obrazowaniu z tomografii komputerowej w dwóch perspektyw D) Przestrzenne przedstawienie wizualizacji samek zastawki TAVI w 3D. E) Edukacyjny przypadek badawczy w mieszanej rzeczywistości podczas procesu nauczania i uczenia się.

obrazu 3D specyficznej anatomii serca pacjenta. Naszym celem było opracowanie zintegrowanego procesu uzyskiwania szczegółowych modeli anatomicznych w połączeniu z trójwymiarową reprezentacją EKG.

Dane obrazowe zostały segmentowane za pomocą 3D Slicer (wersja 5.2.2) [23]. 3D Slicer to zaawansowane oprogramowanie open-source do analizy i wizualizacji danych medycznych oraz badań obrazowych. Jest szeroko stosowane w medycynie i biologii do przetwarzania obrazów uzyskanych z różnych technik, takich jak tomografia komputerowa (CT), rezonans magnetyczny (MRI) czy ultrasonografia (USG). Tomografia komputerowa (CT) z kontrastem była przeprowadzana w sekwencjach izowokselowych (3D) w płaszczyznach strzałkowej, czołowej i poprzecznej. Model został podzielony na kilka oddzielnych komponentów, takich jak lewy/prawy przedsionek, lewa/prawa komora oraz tętnice. Aktywacja serca w 3D (PathECG) została wyznaczona na podstawie 12-odprowadzeniowego EKG w połączeniu ze specyficznym dla pacjenta modelem serca/tułowia, przy użyciu oprogramowania CineECG (wersja 6357, ECG-Excellence BV, Holandia). Na koniec zaimplementowaliśmy nową metodę optymalizacji siatki trójkątów dla modeli 3D, wynikającą z ograniczenia wyświetlania obrazów w rzeczywistości mieszanej przez HoloLens2 do 500 000 trójkątów, z minimalną utratą szczegółów anatomicznych (rys.9). Demonstrujemy wyniki naszego procesu za pomocą danych pacjenta z trwałym migotaniem przedsionków i wrodzoną skorygowaną transpozycją wielkich naczyń (ccTGA), kwalifikującego się do terapii stymulacji pęczka Hisa. Wynik tego systemu został wykorzystany podczas procedury, aby zwiększyć jej skuteczność i bezpieczeństwo.



Rys. 9. Model 3D wrodzonej skorygowanej transpozycji wielkich tętnic (ccTGA) demonstrujący niezgodność przedsionkowo-komorową i komorowo-tętniczą [24].

PRZYKŁAD 5

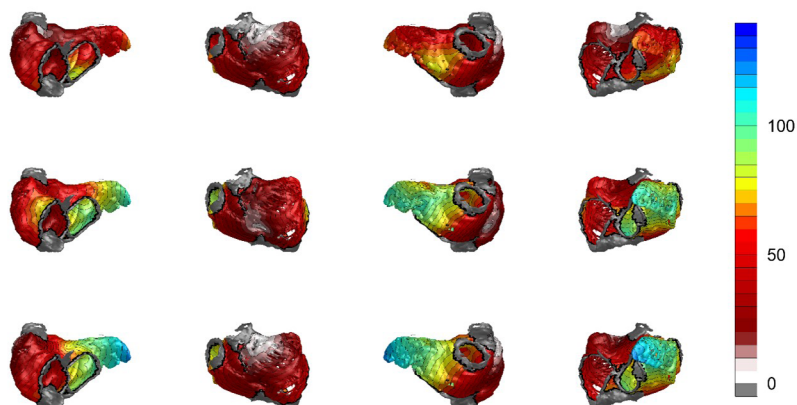
Interaktywne Nauczanie 3D Anatomicznej Budowy Serca
w Medycynie: Anatomia przedsionków wzbogacona o EKG
i wizualizację 3D

Autorzy przypadku: Danila Potyagaylo, Peter van Dam, Agnieszka Pręgoska, Andrew Atkinson, Halina Dobrzynski, Damian Dołęga-Dołęgowski, Klaudia Proniewska.

W tym przypadku łączymy dane multimodalne, co pozwala na głębsze zrozumienie genezy załamka P w sygnale EKG [25]. Ponadto zwiększa to wizualizację, a tym samym ułatwia zrozumienie i naukę mechanizmów pobudzenia serca. Aby osiągnąć ten dwutorowy cel, wykorzystujemy

dane mikro-CT (mCT) przedsionków ludzkich, metodologię CineECG [26] oraz środowisko rzeczywistości mieszanej. Pozyskiwanie i przetwarzanie danych mCT używanych w tej pracy zostało wcześniej opisane w Stephenson et al. (2017) [27]. Wysokorozdzielcze siatki trójkątne (498 121 węzłów) dla modelu przedsionków serca posłużyły jako dane wejściowe do naszych obliczeń i wizualizacji. Interpretacja 12-odprowadzeniowego EKG jest umiejętnością wymagającą szerokiej wiedzy z zakresu elektrofizjologii serca. Ponadto dekodowanie EKG zazwyczaj wiąże się z zastosowaniem heurystyk opartych na regułach ignorujących wewnętrzne relacje anatomiczne podczas propagacji fali pobudzenia. W tym kontekście CineECG jest nowym narzędziem, pozwalającym na anatomicznie dostosowaną reprezentację aktywacji serca Boonstra et al. (2022a) [28]. Wykazano, że poprawnie odzwierciedla średnie położenie i kierunek aktywacji serca, odzyskuje klinicznie istotne cechy rozprzestrzeniania się pobudzenia i niezawodnie odnosi trajektorię aktywacji do trójwymiarowej geometrii serca. Poza dowodem koncepcji wykazano również, że ta metodologia otwiera nowe spojrzenie na normalne rozmieszczenie załamka P Locati et al. (2022) [29] i jest instrumentalna w trójwymiarowej detekcji wczesnego etapu bloku międzyprzedsionkowego Baturova et al. (2023) [30]. Rozszerzając zastosowanie tej metodologii do analizy załamka P, rozważaliśmy trzy następujące przypadki różnych morfologii załamka P, podkreślając korzyści z podejścia opartego na złożonej reprezentacji w celu identyfikacji zindywidualizowanych wzorców depolaryzacji przedsionków związanych z trójwymiarową anatomią. Zdrowy, „normalny” odwrócony załamek P oraz załamek P morfologicznie wskazujący na blok w pęczku Bachmanna zostały wyodrębnione z bazy danych PTB-XL ECG Wagner et al. (2020). Anatomia przedsionków z mCT została następnie dopasowana do modelu ciała z predefiniowanymi lokalizacjami elektrod EKG. Mając sygnały EKG i anatomiczne relacje między tułowiem a przedsionkami,

obliczyliśmy średnią trajektorię aktywacji przez geometrię przedsionków. Na podstawie tej średniej ścieżki aktywacji określiliśmy najwcześniejsze miejsce aktywacji, odpowiadające momentowi przełamania pobudzenia w węzle zatokowo-predsionkowym, jako węzeł siatki powierzchniowej najbliższy początkowi trajektorii. Mając początek pobudzenia, przeprowadziliśmy symulację najszybszej trasy, aby obliczyć czasy aktywacji na całej powierzchni przedsionków, a wygenerowana sekwencja pobudzenia została następnie zoptymalizowana, aby dopasować się do zarejestrowanego EKG Boonstra et al. (2022b) [31]. Jeszcze większe ulepszenie w reprezentacji danych i prezentacji zapewnia technologia mieszanej rzeczywistości, umożliwiającą immersyjne doświadczenie, a tym samym lepsze zrozumienie związku między anatomią serca a aktywnością elektryczną serca (rys. 10).



Rys. 10. Widoki przedsionków. Górny rząd odpowiada wizualizacji propagacji fali elektrycznej dla normalnego załamka P [32]; środkowy rząd: odwróconego załamka P [33]; dolny rząd: bloku międzyprzedsionkowego [34]. Od lewej do prawej prezentujemy widoki: widok AP (przednio-tylny), widok strzałkowy prawy (czyli z prawej do lewej w ciele), widok PA (tylno-przedni), widok strzałkowy lewy (czyli z lewej do prawej w ciele).

Wizualizacja rzeczywistości mieszanej (Mixed Reality) podczas robotycznej resekcji zmiany wątrobowej i jej wpływ na doświadczenie pacjenta

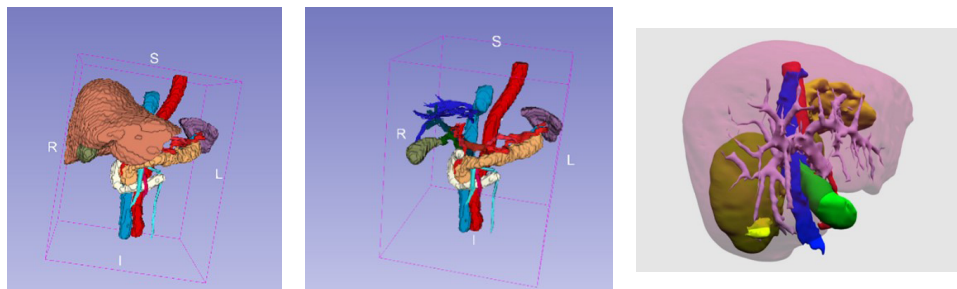
Autorzy: Radek Kolecki, Antoni Szczepanik, Tomasz Rogula, Jakub Kenig, Anna Grochowska, Klaudia Proniewska, Natalia Plawiak, Piotr Richter.

52-letnia kobieta zgłosiła się na robotyczną resekcję zmiany o średnicy 2 cm na powierzchni/wewnątrz torebkowej wątroby w obrębie segmentów 5 i 6 po kilku miesiącach dyskomfortu brzuszego i wzdęć po posiłkach. Przedoperacyjne badanie rezonansu magnetycznego (MRI) opisało niejednoznaczną masę podtociową z lekkim występowaniem poza torebkę.

Dane źródłowe, pliki DICOM z rezonansu magnetycznego (MRI) zostały przetworzone za pomocą oprogramowania do analizy i wizualizacji obrazów medycznych 3D Slicer. Segmentacja kluczowej anatomii, tj. wątroby, zmiany wątrobowej, żył wrotnych i wątrobowych, tętnic oraz pęcherzyka żółciowego, została przeprowadzona i zweryfikowana przez radiologa (rys. 11). Model segmentacji został zwizualizowany w rzeczywistości mieszanej za pomocą Microsoft HoloLens2 i aplikacji ApoQlar's VSI Holomedicine. Poziom przedoperacyjny stres pacjenta oceniano za pomocą zwalidowanego Kwestionariusza Lęku Chirurgicznego przed i po pokazaniu pacjentowi modelu, a ewentualne różnice były porównywane. W trakcie operacji wirtualny model przestrzenny w mieszanej rzeczywistości był wykorzystywany do dokładnego pozycjonowania pacjenta oraz ramion robota chirurgicznego Asensus Senhance w celu uzyskania optymalnego dostępu. Resekcja została przeprowadzona z wykorzystaniem robota Senhance w modyfikowanym podejściu laparoskopowym.

To potwierdzono w trakcie operacji, korzystając zarówno z monitora robota, jak i modelu holograficznego wygenerowanego z MRI i wyświetlanego na Microsoft HoloLens. Podjęto decyzję o wykonaniu lokalnej resekcji zmiany z szerokim marginesem przy użyciu systemu chirurgicznego wspomaganego przez holograficzną wizualizację strukturalną. Po pokazaniu modelu holograficznego w 3D poziom stresu przedoperacyjnego pacjenta zmniejszył się, a jego chęć zgłębienia wiedzy na temat zabiegu oraz ogólne zrozumienie obrazów medycznych wzrosły. Operacja została zakończona zgodnie z planem, a pacjent został wypisany w czwartym dniu po operacji po bezproblemowym okresie rekonwalescencji.

Wizualizacja segmentacji obrazów radiologicznych za pomocą gogli HoloLens w technologii immersyjnej obiecuje doskonale perspektywy w dziedzinie chirurgii. Chirurg może szybko i łatwo przejrzeć segmentację w celu planowania operacji, a następnie aktywnie korzystać z niej jako referencji intraoperacyjnej, nie opuszczając pola sterylnego (rys. 12). Pacjent może uzyskać mniejszy poziom lęku i zyskać nowe zrozumienie planowanego zabiegu.



Rys. 11. Model 3D wątroby, zmiany wątrobowej, żył wrotnych i wątrobowych, tętnic oraz pęcherzyka żółciowego.



Rys. 12. Wizualizacja segmentacji obrazów radiologicznych za pomocą gogli HoloLens w technologii immersyjnej śródoperacyjnie [35].

PODSUMOWANIE

Po krótkiej analizie przedstawionych przypadków klinicznych widzimy, że połączenie obrazowania trójwymiarowego i rzeczywistości immersyjnej pozwala na conceptualizację podejścia do zaawansowanego planowania strategii diagnostyczno-terapeutycznych, zapewniając nową metodę wizualizacji danych medycznych, ułatwiającą zrozumienie relacji przestrzennych obrazowych danych medycznych z uwzględnieniem danych klinicznych. To, co wyróżnia proponowane podejście do wizualizacji danych medycznych w immersyjnym środowisku, to jego integracja z przepływem pracy klinicznej sprzyjająca środowisku synergii współpracy między inżynierami laboratoryjnymi, lekarzami prowadzącymi, lekarzami radiologami i samymi pacjentami. Ta trójstronna współpraca

zapewnia, że technologie 3D, często postrzegane jako złożone, stają się łatwymi w użyciu narzędziami, które usprawniają diagnostykę i leczenie wszystkim zaangażowanym stronom. Centralnym elementem planowania 3D, wzbogaconym o cyfrową immersyjną wizualizację danych medycznych, jest koncepcja zindywidualizowanej opieki nad pacjentem. To podejście nie jest rozwiązaniem uniwersalnym, ale raczej skrupulatnym połączeniem możliwości technologicznych i oczekiwań medycznych profesjonalistów, jak również możliwości lepszej współpracy z pacjentami, przy uwzględnieniu zmniejszenia ich lęków i obaw związanych z przebiegiem terapii czy operacji. Chociaż użyteczność tej metodologii ma swoje korzenie w innych dziedzinach, jak budownictwo czy gry komputerowe, jej potencjalne zastosowania obejmują szeroki zakres dyscyplin medycznych. Głównym celem tej innowacji jest podkreślenie możliwości najnowocześniejszych technik obrazowania 3D wzbogaconych o niuanse rzeczywistości immersyjnej. Zastosowanie tych technik przynosi podwójną korzyść: usprawnienie procesu planowania przedproceduralnego oraz zapewnienie dokładnego monitorowania śródproceduralnego w czasie rzeczywistym, a także poproceduralny monitoring. Jedną z wyjątkowych cech technologii immersyjnych w tej konfiguracji jest jego zdolność adaptacji. W zależności od wymagań procedury lub preferencji lekarza obrazowe dane medyczne możemy prezentować z wielu perspektyw, dopasować je do potrzeb sytuacji i personalizować pod pacjenta oraz możliwości medycznych profesjonalistów. Połączenie planowania 3D i rzeczywistości immersyjnej stanowi zmianę paradygmatu w opiece nad pacjentem. Poprzez nadanie priorytetu zindywidualizowanym planom leczenia takie podejście zapewnia, że każdy pacjent otrzyma opiekę, która jest nie tylko skuteczna, ale także dostosowana do jego unikalnych potrzeb.

3

SKONFIGUROWANIE ŚRODOWISKA DOSTOSOWANEGO DO POTRZEB PLANOWANIA 3D, W TYM RZECZYWISTOŚCI IMMERSYJNEJ

■ OBRAZOWANIE MEDYCZNE

Pierwszym krokiem w tworzeniu dostosowanego do potrzeb planowania 3D jest uzyskanie wysokiej jakości danych obrazowania medycznego anatomii pacjenta. Można to zrobić za pomocą technik takich jak tomografia komputerowa (CT), rezonans magnetyczny (MRI), ultrasonografia (USG) lub inne metody obrazowania medycznego. Dane pozyskiwane w formacie DICOM [36].

■ REKONSTRUKCJA 3D DANYCH MEDYCZNYCH

Rekonstrukcja 3D ma na celu przekształcenie dwuwymiarowych obrazów, na przykład z tomografii komputerowej (CT), w trójwymiarowy model, co pozwala na wizualizację struktur wewnętrznych ciała pacjenta oraz ich lepsze rozumienie. Proces rekonstrukcji polega na zbieraniu serii obrazów 2D przy wykorzystaniu dedykowanych algorytmów, a następnie złożenie ich w trójwymiarową reprezentację. Wykorzystuje techniki interpolacji i filtracji w celu wygenerowania przestrzennego modelu. Bardzo często algorytmy rekonstrukcji danych medycznych wbudowane do systemów akwizycji danych medycznych.

■ SEGMENTACJA 3D

Segmentacja danych medycznych w 3D ma na celu identyfikację i wyodrębnienie konkretnych struktur anatomicznych (na przykład narządów, tkanek, guzów) z trójwymiarowego modelu. Pozwala na dokładne zlokalizowanie i analizę specyficznych obszarów zainteresowania. Segmentacja polega na klasyfikacji poszczególnych pikseli (w 2D) lub wokseli (w 3D) na podstawie ich cech, takich jak intensywność sygnału. Wykorzystuje zaawansowane techniki przetwarzania obrazu, w tym algorytmy uczenia maszynowego, sieci neuronowe oraz metody progowe i klasteryzacji.

■ MODELOWANIE 3D

Modelowanie 3D to proces tworzenia trójwymiarowej reprezentacji obiektu za pomocą specjalistycznego oprogramowania komputerowego. Podstawowym celem modelowania 3D jest stworzenie trójwymiarowej

geometrii obiektu, która może być reprezentowana jako siatka złożona z wierzchołków, krawędzi i powierzchni (polygonów). Istnieje wiele technik modelowania 3D [37]. Po stworzeniu geometrii modele 3D mogą być pokryte teksturami i materiałami, które nadają im realistyczny wygląd. Tekstury mogą zawierać kolory, wzory, a nawet właściwości fizyczne, takie jak przezroczystość czy odbicie światła. Modele 3D mogą być animowane, co oznacza, że mogą być wprowadzane w ruch. Symulacje fizyczne mogą dodawać realizmu, uwzględniając takie aspekty jak grawitacja, kolizje i dynamika płynów. Ostatecznym krokiem w procesie modelowania 3D jest renderowanie, czyli generowanie finalnego obrazu lub animacji z modelu 3D. Renderowanie uwzględnia oświetlenie, cienie, odbicia i inne efekty, aby stworzyć realistyczną lub stylizowaną wizualizację.

RENDERING

Rendering objętościowy (volumetric rendering) [38] [39] i rendering powierzchniowy (surface rendering) [40] to dwie różne techniki stosowane w grafice komputerowej, szczególnie w kontekście wizualizacji trójwymiarowych danych. Oto główne różnice między nimi [41]:

- Rendering objętościowy to technika wizualizacji trójwymiarowych danych, które są reprezentowane jako ciągła funkcja przestrzenna lub siatka wokseli (volumetric pixels). Woksele to odpowiedniki pikseli, ale w trzech wymiarach.
- Rendering powierzchniowy to technika wizualizacji, w której trójwymiarowe obiekty są reprezentowane za pomocą siatek wielokątów (zazwyczaj trójkątów) opisujących ich powierzchnie.

W kontekście danych medycznych rendering objętościowy i powierzchniowy mają różne zastosowania i zalety, które pomagają specjalistom w analizie i diagnozie. Rendering objętościowy jest wykorzystywany do wizualizacji trójwymiarowych danych uzyskanych z tomografii komputerowej (CT) lub rezonansu magnetycznego (MRI), gdzie całe wnętrze ciała pacjenta, włącznie z organami wewnętrznymi, tkankami miękkimi i płynami, może być dokładnie odwzorowane. Pozwala to na analizę strukturalną oraz identyfikację anomalii, takich jak guzy, wewnętrzne krwawienia czy uszkodzenia tkanki. Z kolei rendering powierzchniowy jest stosowany do tworzenia trójwymiarowych modeli powierzchni organów, kości czy innych struktur anatomicznych, umożliwiając chirurgom i lekarzom dokładne planowanie zabiegów i analizę zewnętrznych cech anatomicznych. Ta technika jest szczególnie przydatna w chirurgii rekonstrukcyjnej i ortopedii, gdzie precyzyjne modele powierzchni pomagają w planowaniu interwencji chirurgicznych oraz w ocenie postępów leczenia.



WIRTUALNE REPREZENTACJA TRÓJWYMIAROWYCH DANYCH CYFROWYCH

Po uzyskaniu danych obrazowania medycznego następnym krokiem jest przekształcenie danych w wirtualny model 3D za pomocą specjalistycznego oprogramowania środowiska programistycznego, na przykład UnrealEngine. Ten wirtualny model jest cyfrową repliką anatomii pacjenta (cyfrowym bliźniakiem) i pozwala na dokładne pomiary, jeśli jest taka potrzeba, oraz wizualizacje struktur anatomicznych pacjenta w relacji przestrzennej.

■ PLANOWANIE 3D

Kolejnym krokiem po utworzeniu modelu wirtualnego (wirtualnej reprezentacji / cyfrowego bliźniaka) pacjenta jest zaplanowanie operacji lub leczenia w środowisku 3D. Pozwala to na precyzyjną wizualizację anatomii pacjenta oraz dokładne zaplanowanie podejścia chirurgicznego lub zabiegowego.

■ RZECZYWISTOŚĆ IMMERSYJNA

Po zakończeniu planowania 3D następnym krokiem jest użycie technologii rzeczywistości mieszanej w celu stworzenia bardziej wciągającego i interaktywnego środowiska dla lekarza i medycznych profesjonalistów. Polega to na nałożeniu wirtualnego modelu 3D na rzeczywiste środowisko za pomocą dedykowanych gogli immersyjnych.

■ TESTOWANIE I WALIDACJA

Wreszcie planowanie 3D, w tym rzeczywistość immersyjnej, może być testowane i weryfikowane za pomocą symulacji i innych technik, aby zapewnić, że podejście planowania przedoperacyjnego i monitoringu może być dokładniejsze i bardziej skuteczne, jak również weryfikacji przez lekarza radiologa i lekarza prowadzącego.

Po zakończeniu procesów planowania i testowania procedura lub leczenie mogą zostać wdrożone w świecie rzeczywistym. Model 3D i narzędzia rzeczywistości immersyjnej mogą być wykorzystywane do prowadzenia zespołu medycznego podczas rzeczywistego zabiegu (tzw. proktoring) lub leczenia, zapewniając, że jest ono wykonywane z precyzją i dokładnością.

3.1 Doświadczenia własne z UJCM

W edukacji medycznej technologie immersyjne stanowią potężne narzędzie do wizualizacji ludzkiego ciała. Studenci oraz medyczni profesjonaliści mogą zobaczyć na przykład, jak działają stawy w różnych pozycjach ciała, obserwować płuca podczas oddychania oraz obserwować bicie serca i go słuchać. Każdy element naszego ciała może być cyfrowo przedstawiony i wyświetlany jako realistyczny obraz 3D, a nawet jego dynamiczną cyfrową interpretację. W technologii immersyjnej ciało może być wizualizowane w formie prezentacji przestrzennej, na przykład możemy obracać pozycję serca w relacji z klatką piersiową. Wyobraź sobie możliwość zobaczenia swojego mózgu, jego połączeń nerwowych, czaszki, kości policzkowych, zębów, układu krążenia i limfaticznego prezentowanych na wykładach z anatomii oraz interakcję z tymi układami. W dobie COVID-19, gdy potrzebne są zdalne i angażujące źródła edukacyjne, rzeczywistość immersyjna może być rozwiązaniem umożliwiającym stworzenie wirtualnego pokoju, gdzie z różnych położeń geograficznych możemy się spotkać w tym samym czasie i „przestrzeni”. Może być używana w procesie uczenia się wraz z ludźmi z całego świata, zarówno wewnątrz, jak i na zewnątrz społeczności edukacyjnej i czy

naukowej. Medycyna to dziedzina dynamicznie rozwijająca się dzięki postępom technologicznym w tworzeniu nowych urządzeń, oprogramowania czy procesów. Postępy w technologiach obrazowania odegrały kluczową rolę w ułatwianiu planowania i monitorowania skomplikowanych operacji. Jednak w miarę wzrostu złożoności pojawia się coraz większa potrzeba nowych rozwiązań obrazowania, aby sprostać pojawiającym się wyzwaniom klinicznym, jak można zobaczyć na przykładach prac badawczych, które realizujemy – również w obszarze edukacji. Dlatego w zespole postawiliśmy na rzetelną wiedzę połączoną z badaniami naukowymi dotyczącą weryfikacji korzyści edukacji medycznej przy wykorzystaniu technologii immersyjnych [42].

Technologie immersyjne dają studentom możliwość doświadczenia możliwości pozytywnej interakcji z cyfrowymi bliźniakami / wirtualnymi pacjentami. Z drugiej strony, korzystanie z zamkniętego, sztucznie stworzonego, klaustrofobicznego środowiska może prowadzić do negatywnych doświadczeń i uczuć oraz powodować skutki uboczne. Rozpoznanie i monitorowanie tych skutków było bardzo ważne, ale nie zawsze jest wystarczająco kontrolowane. Grupy docelowe, z którymi współpracaliśmy, to studenci medycyny, nauczyciele akademicki w uczelniach medycznych w Polsce i Europie, lekarze pracujący ze studentami oraz personel medyczny. Przeprowadzono bardzo niewiele badań naukowych opisujących negatywne skutki i skutki uboczne technologii immersyjnych. Jednak bardzo ważne było rozpoznanie i monitorowanie tych efektów. Zaprezentowane badania przez UJCM są ważnym elementem uzupełniającym badania na całym świecie. Ocena związku między percepcją a informacją o doświadczeniu emocjonalnym w środowiskach cyfrowych została ustandaryzowana za pomocą testów psychologicznych. Ocena rzeczywistości immersyjnej w postaci wyświetlania danych medycznych w trzech wymiarach jako narzędzia umożliwiającego

obiektywizację przez odbiorcę (tj. lekarza i pacjenta), w celu sprawdzenia skutków ubocznych technologii immersyjnych tj. cyberchoroba, czasami nazywana również chorobą symulatorową [43].

Rozważając użycie technologii immersyjnej, na przykład rzeczywistości mieszanej (MR), ważne jest, aby ocenić wpływ psychologiczny, jaki może ona mieć na użytkowników.

Oto kilka uwag dotyczących oceny psychologicznej:

■ PERCEPCJA I DOŚWIADCZENIE SENSORYCZNE

Wciągająca natura MR może stworzyć realistyczne i żywe wrażenia zmysłowe dla użytkowników. Może to jednak również prowadzić do uczucia dezorientacji, choroby lokomocyjnej i zniekształceń percepcji. Dlatego ważne jest, aby ocenić, jak użytkownicy postrzegają i doświadczają MR, aby określić, czy jest to dla nich odpowiednia technologia.

■ REAKCJE EMOCJONALNE

Stosowanie MR może wywoływać silne reakcje emocjonalne, zarówno pozytywne, jak i negatywne. Ważne jest, aby ocenić, jak użytkownicy reagują emocjonalnie na doświadczenia związane z MR i czy te reakcje emocjonalne są odpowiednie dla kontekstu, w którym MR jest używane.

■ LĘK I STRES

Niektórzy użytkownicy mogą odczuwać niepokój lub stres podczas korzystania z MR, szczególnie jeśli znajdują się w symulowanym środowisku, które jest nieznane lub trudne. Ważne jest, aby ocenić potencjał lęku i stresu oraz zapewnić użytkownikom odpowiednie wsparcie i strategię radzenia sobie.

■ OBCIĄŻENIE POZNAWCZE

Doświadczenia MR mogą wymagać znacznego obciążenia poznawczego, szczególnie jeśli użytkownicy muszą wykonywać wiele zadań jednocześnie lub przetwarzać dużą ilość informacji. Ważne jest, aby ocenić obciążenie poznawcze, jakie doświadczenia MR wywierają na użytkowników, i upewnić się, że mają oni niezbędne zasoby poznawcze do efektywnego korzystania z MR.

■ SATYSFAKCJA UŻYTKOWNIKA

Na koniec ważne jest, aby ocenić satysfakcję użytkowników z doświadczeń MR. Na satysfakcję użytkownika może wpływać wiele czynników, w tym jakość doświadczenia, łatwość użytkowania oraz stopień, w jakim doświadczenie spełnia oczekiwania użytkowników.

4

AUTORSKI PROGRAM EDUKACJI MEDYCZNEJ W 3D

4.1. Anatomia w 3D

Innowacyjne podejście do edukacji to wykorzystanie okularów HoloLens2 i mieszanej rzeczywistości (MR) do pomocy studentom medycyny pierwszego roku w dokładnym zrozumieniu anatomii człowieka. Tradycyjnie studenci polegali na atlasach książkowych, które oferują uproszczony widok struktur anatomicznych. Poprzez analizę licznych obrazów 2D studenci mają za zadanie łączyć informacje i wizualizować przestrzenny układ systemów narządów. Aby zniwelować różnice w rozumieniu przestrzennym i przetwarzaniu wiedzy, w roku akademickim 2022/2023 uruchomiono pilotażowy program z wykorzystaniem programu HoloAnatomy® Software Suite [44] w ramach zajęć dodatkowych na UJCM. Opracowany przez Case Western University i Cleveland Clinic, HoloAnatomy® Software Suite, to nowoczesny program nauki anatomii

w technologii immersyjnej. Program został zakupiony w ramach europejskiego grantu ERASMUS+ „MRAME – Mixed Reality support Advanced Medical Education – nowe metody nauczania umiejętności medycznych” i wdrożony w UJCM [45]. W ramach rozwijania nowych metod wizualizacji struktur anatomicznych w trójmiarze przygotowałam pilotażowy program dotyczący nauki anatomii w 3D. Program był realizowany w ramach zajęć dodatkowych dla studentów medycyny pierwszego roku. Realizacja programu pilotażowego była i jest możliwa dzięki współpracy z Katedrą Anatomii UJCM, której kierownikiem jest Profesor Jerzy Walocha. Zespół anatomów dbał o merytoryczny kontent programu. Realizacja technologiczna i przygotowanie infrastruktury było przygotowane w Centrum Medycyny Cyfrowej i Robotyki, pod moim przewodnictwem.

HoloAnatomy® Software Suite wykorzystuje zaawansowane technologie, oferując studentom rewolucyjny sposób nauki anatomii. Prezentuje atlas 3D zawierający do 9 000 struktur anatomicznych.. Rdzeń doświadczenia z nauki w 3D stanowi holograficzny pokaz slajdów przedstawiający precyzyjne trójwymiarowe modele korespondujące z układem anatomicznym omawianym na zajęciach. Modele te są starannie dobrane, aby uniknąć nadmiaru informacji, a struktury są podświetlone kolorem, co ułatwia zapamiętywanie, oraz przezroczyste, co pozwala zrozumieć układ organów. Okulary umożliwiają użytkownikom oglądanie, obracanie, powiększanie i interakcję z hologramami z każdej strony, w tym zarówno męskie, jak i żeńskie układy, a nawet porównywanie dwóch modeli jednocześnie.

Wartość tych lekcji została wzbogacona o wkład studentów medycyny i członków Koła Naukowego Medycyny Cyfrowej i Robotyki Uniwersytetu Jagiellońskiego, którego przewodniczącą jest Julianna Dąbrowa. Ta interdyscyplinarna współpraca zapewniła, że pilotaż nauki 3D był zgodny z bieżącymi zajęciami z sekcji i teorii (rys. 13).

Po każdych zajęciach przeprowadzano oceny krytyczne, w tym ankiety dotyczące wcześniejszej wiedzy na temat technologii 3D, wrażeń z korzystania z MR i jej wpływu na istniejącą wiedzę. Przeprowadzono również psychologiczną ocenę korzystania z MR – pod kierunkiem dr. Piotra Waleckiego, psychologa, członka zespołu MRAME.

Podsumowując, HoloAnatomy® Software Suite okazał się cennym narzędziem w rozszerzaniu wiedzy anatomicznej zdobytej podczas tradycyjnych zajęć. Oferuje studentom kompleksowy widok topografii ludzkiej, który jest niezbędny do budowania teoretycznych podstaw klinicznego zastosowania anatomii.



Rys. 13. Zajęcia z Anatomii w 3D przy wykorzystaniu technologii immersyjnej w UJCM prowadzone przez anatoma [źródło własne].

4.2. Spersonalizowana anatomia w 3D bazująca na przypadkach klinicznych

Podczas realizowanego przeze mnie autorskiego kursu „Metody wizualizacji danych medycznych przy wykorzystaniu technologii mieszanej rzeczywistości”, w ramach programu Doskonały Uniwersytet [46], przygotowałam, wraz ze specjalistami z UJCM, 20 studiów przypadków klinicznych wysokiej wierności. Każdy przypadek opierał się na danych obrazowych pacjentów. Podstawą było wskazanie przez lekarza specjalistę aspektów ważnych w diagnostyce klinicznej i planowaniu przedoperacyjnym. Następnie zajmowałam się przetworzeniem danych obrazowych (w procesie segmentacji) do modelu 3D, dostosowując model do potrzeb wskazanych przez specjalistów. Tak przygotowany model był importowany do gogli, wyświetlany jako hologram w projekcji 3D w okularach mieszanej rzeczywistości Hololens2. Modelowi 3D towarzyszyły z tyłu slajdy z opisem przypadku, wynikami badań biochemicznych i postępowaniem. Edukatorem danego przypadku był operator zabiegowy, dzięki czemu studenci otrzymywali realistyczne doświadczenie. Przedstawiony przykład zastosowania pokazuje, że nadrzędną wartością była interdyscyplinarna współpraca lekarzy specjalistów i mnie jako inżyniera biomedycznego zajmującego się obróbką danych medycznych. Takie podejście zapewnia kompleksowe nauczanie – połączenie edukacji studentów ostatnich lat kierunków medycznych z praktycznym zastosowaniem wskazanej technologii w diagnostyce klinicznej i zabiegach. W taki sposób zostają zrównane luki edukacyjne jednostek i poziom wiedzy teoretycznej zdobywanej przez pierwsze lata kierunków medycznych. Innym aspektem jest wykorzystanie danych prawdziwych pacjentów. Jest to kwestia spersonalizowanej medycyny i podejścia indywidualnego do pacjenta. Każdy człowiek nawet w minimalnym stopniu różni się budową

od innych. Te różnice mają wpływ na decyzyjność i podejmowane działania przez młodych, niedoświadczonych lekarzy. Nauka na podstawie prawdziwych przypadków, pozwala na zdobycie doświadczenia przez studenta niepracującego jeszcze w szpitalu (rys. 14).



Rys. 14. Zajęcia ze spersonalizowanej anatomii 3D na przypadkach klinicznych w technologii immersyjnej w UJCM przez specjalistę neurochirurga [źródło własne].

5

PSYCHOLOGICZNE ASPEKTY KORZYSTANIA Z TECHNOLOGII IMMERSYJNYCH

Autorzy: Piotr Walecki, Klaudia Proniewska

Aby lepiej zrozumieć psychologiczny wpływ korzystania z technologii immersyjnych, przeprowadziliśmy badanie, które miało na celu ewaluację i porównanie skuteczności oraz potencjalnych wyzwań związanych z różnymi technologiami edukacyjnymi w nauczaniu medycznym, skupiając się na takich immersyjnych technologiach 3D jak rzeczywistość wirtualna (VR), rzeczywistość rozszerzona (AR) oraz rzeczywistość mieszana (MR).

Postęp technologiczny utorował drogę do transformacyjnego podejścia do edukacji medycznej. Technologie takie jak VR, AR i MR obiecują bardziej wciągające i potencjalnie skuteczne doświadczenia edukacyjne w porównaniu z tradycyjnymi metodami nauczania. Biorąc pod uwagę kluczową rolę edukacji medycznej w kształtowaniu przyszłych specjalistów, ważne jest, aby zrozumieć, w jaki sposób te nowsze narzędzia

edukacyjne wpływają na uczniów, zwłaszcza w zestawieniu z konwencjonalnymi metodami nauczania. Niniejsze badanie miało na celu zebranie doświadczeń i ocenę wpływu tych technologii na uczenie się i rozumienie przez studentów medycyny [47].

W badaniu uczestniczyło 84 studentów medycyny, w tym 53 kobiety i 31 mężczyzn, o średnim wieku 21 lat, z odchyleniem standardowym 1,5. Projekt badania obejmował 20-godzinny kurs, w trakcie którego uczestnicy mieli kontakt z różnymi technologiami edukacyjnymi. W ramach kursu uczestnicy zapoznawali się z technologiami VR, AR, MR oraz tradycyjnym nauczaniem wspomagany multimediami. VR oferowało wciągające doświadczenia, w których uczniowie mogli wchodzić w interakcje z reprezentacjami 3D scenariuszy medycznych lub struktur anatomicznych. AR nakładało na świat rzeczywisty informacje cyfrowe, takie jak modele 3D. MR stanowiło połączenie VR i AR, w którym cyfrowe obiekty 3D były zintegrowane ze środowiskiem fizycznym i można było z nimi wchodzić w interakcje. Tradycyjne nauczanie polegało na wyświetlaniu treści medycznych na 75-calowym ekranie multimedialnym 2D, podobnym do tradycyjnego nauczania w klasie, ale wzbogaconym o możliwości multimedialne. Uczestnicy kolejno zapoznawali się z każdą z wyżej wymienionych technologii, mając okazję angażować się i zgłębiać treści prezentowane za pomocą każdej metody. Przez cały czas trwania kursu obserwowano i rejestrowano efektywność, poziom zaangażowania i zrozumienie uczestników. Po zakończeniu kursu zebrano informacje zwrotne od uczestników na temat ich doświadczeń z każdą technologią. Zebrano zarówno dane ilościowe, jak i jakościowe, aby zapewnić całościowe zrozumienie doświadczeń uczniów oraz potencjalnych zalet i wad każdej metody nauczania.

Badanie miało na celu ocenę poziomu immersji i zaangażowania oferowanego przez każdą metodę nauczania, zrozumienie potencjalnych

konsekwencji długotrwałej ekspozycji na technologie edukacyjne 3D dla zdrowia fizycznego i psychicznego, identyfikację wyzwań technicznych napotykanym przez uczniów podczas korzystania z VR, AR i MR oraz porównanie skuteczności tych nowoczesnych narzędzi dydaktycznych z tradycyjnymi metodami nauczania w zakresie zapamiętywania wiedzy i rozumienia. Zasadniczo badanie miało na celu przedstawienie kompleksowego przeglądu korzyści i wyzwań związanych z integracją technologii 3D z edukacją medyczną oraz ustalenie, czy mogą one potencjalnie zastąpić lub uzupełnić istniejące metodologie nauczania.

Wyniki przedstawiają kompleksowe spojrzenie na potencjalne wady integracji VR i AR/MR z edukacją medyczną w porównaniu z tradycyjnymi metodami nauczania. Wirtualna rzeczywistość (VR) stanowi wyzwanie przede wszystkim ze względu na wysokie koszty związane ze sprzętem, oprogramowaniem i treściami edukacyjnymi, co zgłasza aż 82,14% uczestników. Innym istotnym ograniczeniem VR jest brak bezpośredniego kontaktu z pacjentem (77,38%), co jest kluczowe w edukacji medycznej, gdyż oferuje rzeczywiste doświadczenia i poprawia umiejętności diagnostyczne oraz interpersonalne. Ponadto potencjalne problemy techniczne (77,38%) oraz konieczność ciągłego aktualizowania treści (66,67%) dodatkowo podkreślają dynamiczny charakter technologii VR i wysiłki wymagane do utrzymania jej znaczenia i skuteczności w środowisku edukacyjnym. Rzeczywistość rozszerzona i rzeczywistość mieszana (AR/MR) również borykają się z wysokimi kosztami początkowymi (70,24%) oraz ograniczeniami wynikającymi z dostępności odpowiedniego sprzętu czy infrastruktury (77,38%). Brak bezpośredniego kontaktu z pacjentem (67,86%) stanowi kolejne wyzwanie, podobnie jak potrzeba specjalistycznych szkoleń w celu efektywnego wykorzystania technologii AR/MR (52,38%), co wskazuje, że sama inwestycja w technologię nie wystarczy – instytucje muszą również skupić się na budowaniu

potencjału. Tradycyjne metody nauczania, choć fundamentalne, nie są w stanie sprostać wyzwaniom technicznym i infrastrukturalnym, które występują w przypadku VR i AR/MR. Ich wady są niższe we wszystkich dziedzinach, choć nie są one całkowicie wolne od wyzwań. Konieczność dostosowania programów nauczania (14,29%) i aktualizacji treści (16,67%) to obszary, w których tradycyjne metody napotykają pewne trudności. Chociaż VR i AR/MR oferują transformacyjne możliwości dla edukacji medycznej, wiążą się z zestawem wyzwań, których edukatorzy muszą być świadomi. Zrównoważenie zalet i wad będzie miało kluczowe znaczenie dla instytucji medycznych, które chcą optymalnie wykorzystać te technologie. VR zmaga się z wysokimi kosztami sprzętu, oprogramowania i treści edukacyjnych oraz brakiem bezpośredniego kontaktu z pacjentem i potencjalnymi problemami technicznymi. AR/MR także boryka się z wysokimi kosztami i ograniczeniami w dostępie do sprzętu lub infrastruktury oraz potrzebą specjalistycznych szkoleń, zwłaszcza jeśli chodzi o interaktywne operowanie za pomocą gestów. Edukacja tradycyjna, choć posiada niższy poziom zgłaszanych uwag we wszystkich dziedzinach, napotyka pewne wyzwania związane z dostosowaniem programów nauczania oraz aktualizacją treści. W istocie, podczas gdy VR i AR/MR oferują zaawansowane możliwości edukacyjne, zrównoważenie ich zalet i wad będzie kluczowe dla skutecznej integracji tych technologii w edukacji medycznej.

Kolejne wyniki przedstawiają potencjalne problemy zdrowotne związane z trzema różnymi metodami edukacyjnymi: wirtualną rzeczywistością (VR), rozszerzoną rzeczywistością / mieszaną rzeczywistością (AR/MR) oraz tradycyjną edukacją. VR zdaje się być związana z różnymi zaburzeniami sensorycznymi i fizjologicznymi. Najczęstszym problemem są nudności i zawroty głowy, zgłaszane przez 77,38% użytkowników. Istnieje również duża obawa o bezpieczeństwo fizyczne, a 76,19% respondentów

podkreśla ryzyko kolizji lub upadków z powodu zniekształconego postrzegania otoczenia. Dezorientacja przestrzenna i zjawisko znane jako „choroba cybernetyczna” [43] są również godnymi uwagi problemami. Problemy związane ze wzrokiem, takie jak suchość oczu lub podrażnienie, są oczywiste, co sugeruje, że długotrwała ekspozycja na VR może obciążać oczy. Chociaż AR/MR ma pewne uboczne efekty związane z VR, jego wpływ wydaje się nieco bardziej zróżnicowany. Zmęczenie oczu, szczególnie spowodowane ustawianiem ostrości z bliskiej odległości, wydaje się głównym problemem, przy czym 63,10% uczestników zgłasza efekt zbieżności soczewek. Co więcej, chociaż problemy ze wzrokiem są problemem, podobnie jak w VR, odsetek ten jest nieco niższy. Co ciekawe, efekt „cyberchoroby” jest mniej wyraźny w AR/MR w porównaniu z VR. Może to sugerować, że hybrydowy charakter AR/MR, łączący rzeczywiste i cyfrowe wizualizacje, może być mniej dezorientujący niż pełne zanurzenie w VR. Tradycyjna edukacja, choć pozbawiona problemów sensorycznych wywołanych technologią, nie jest wolna od problemów zdrowotnych. Podstawową kwestią jest tutaj postawa, przy czym 15,48% osób zauważa problemy związane z pozostawaniem w niewygodnych pozycjach przez dłuższy czas. Wskazuje to na siedzący tryb życia tradycyjnych placówek edukacyjnych. Ponadto istnieje niewielka oznaka zmęczenia oczu, prawdopodobnie spowodowana czytaniem lub czasem spędzonym przed ekranem, a także pewne obawy dotyczące problemów dermatologicznych (powodowanych uciskiem gogli na twarz i długotrwałym kontaktem ze skórą). Podczas gdy VR i AR/MR wprowadzają innowacyjne sposoby uczenia się i interakcji z treściami, wiążą się z unikalnym zestawem wyzwań zdrowotnych, głównie skoncentrowanych na dyskomforcie sensorycznym i fizycznym. VR, na przykład, jest związana z nudnościami i zawrotami głowy (77,38%), ryzykiem kolizji z przeszkodami fizycznymi lub upadków oraz

dezorientacją przestrzenną (75,00%). Efekt „cyberchoroby” również jest istotny – 71,43% użytkowników zgłasza to zjawisko, a problemy ze wzrokiem, takie jak suchość oczu lub podrażnienie, dotyczą 69,05% użytkowników. Problemy z równowagą, efekt soczewki zbieżnej oraz zmiany nastroju i samopoczucia są również częstymi dolegliwościami. AR/MR z kolei, choć również powoduje problemy zdrowotne, takie jak zmęczenie oczu (63,10%) i problemy ze wzrokiem (57,14%), wydaje się mniej dotknięta dezorientacją przestrzenną i efektem „cyberchoroby” w porównaniu do VR. Tradycyjna edukacja, mimo że pozbawiona wielu technologicznych problemów sensorycznych, ma swoje własne wyzwania zdrowotne związane głównie z długotrwałym przyjmowaniem określonej postawy ciała, co podkreśla potrzebę uwzględnienia ergonomii we wszystkich środowiskach edukacyjnych.

Następna grupa wyników przedstawia możliwe problemy ze zdrowiem psychicznym związane z trzema metodami edukacyjnymi: wirtualną rzeczywistością (VR), rozszerzoną rzeczywistością / mieszaną rzeczywistością (AR/MR) oraz tradycyjną edukacją. VR wykazuje szereg problemów ze zdrowiem psychicznym, głównie zakorzenionych w immersyjnym charakterze technologii. Największym problemem jest utrata kontaktu z pacjentem, wymieniona przez 71,43% użytkowników, co podkreśla dystans, jaki technologia tworzy między uczniem a rzeczywistymi scenariuszami. Tuż za tym plasuje się przeciążenie sensoryczne i upośledzona zdolność koncentracji, zgłaszane przez 70,24% użytkowników. Poczucie nierealności, reprezentowane zarówno przez derealizację, jak i depersonalizację, wskazuje, jak głęboko immersyjna VR może zmieniać percepcję. To zanurzenie powoduje również niepokój związany z wirtualnymi sytuacjami medycznymi, prawdopodobnie ze względu na jaskrawość symulowanych scenariuszy. AR/MR, będąca mieszanką elementów cyfrowych i rzeczywistych, również budzi obawy, choć są

one nieco mniej wyraźne niż w przypadku VR. Frustracja spowodowana trudnościami technicznymi wyróżnia się na poziomie 60,71%, co sugeruje, że integracja narzędzi AR/MR może napotkać więcej problemów operacyjnych. Chociaż uczucia nierealności (derealizacja i depersonalizacja) są obecne, są one mniej powszechne niż w VR. Może to wynikać z faktu, że AR/MR trzyma jedną nogę w świecie rzeczywistym, łagodząc efekty. Zmęczenie psychiczne jest prawie równo dzielone między AR/MR i VR, co podkreśla wymagający charakter tych metod edukacyjnych. Tradycyjna edukacja, jako nietechnologiczna, wiąże się z innym zestawem problemów ze zdrowiem psychicznym. Najważniejszą kwestią jest tutaj zmęczenie psychiczne, zwłaszcza gdy uczniowie konfrontują się z trudnymi scenariuszami medycznymi (29,76%). Trudności emocjonalne, takie jak lęk i smutek, również mają znaczącą obecność, być może podkreślając presję tradycyjnych systemów edukacyjnych. Co ciekawe, tradycyjna edukacja wykazuje również niewielki odsetek przeciążenia sensorycznego i upośledzonej koncentracji, co sugeruje, że czynniki pozatechnologiczne, takie jak gęsty program nauczania, mogą przyczyniać się do tych uczuć. Chociaż technologie immersyjne, takie jak VR i AR/MR, oferują zaawansowane możliwości uczenia się, wprowadzają wyjątkowe wyzwania związane ze zdrowiem psychicznym. VR i AR/MR mogą powodować problemy takie jak utrata kontaktu z pacjentem (71,43% dla VR i 53,57% dla AR/MR), przeciążenie sensoryczne i upośledzona zdolność koncentracji (70,24% dla VR i 50,00% dla AR/MR) oraz frustracja spowodowana trudnościami technicznymi (70,24% dla VR i 60,71% dla AR/MR). Poczucie nierealności, takie jak derealizacja (67,86% dla VR i 44,05% dla AR/MR) oraz depersonalizacja (63,10% dla VR i 38,10% dla AR/MR), również są znaczące. Lęk związany z wirtualnymi sytuacjami medycznymi dotyczy 54,76% użytkowników VR i 33,33% użytkowników AR/MR, a izolacja społeczna jest zgłaszana przez 53,57%

użytkowników VR i 29,76% użytkowników AR/MR. Tradycyjna edukacja, mimo że technologicznie prostsza, niesie ze sobą własne problemy ze zdrowiem psychicznym, zakorzenione w strukturze i wymaganiach klasycznych środowisk edukacyjnych. Zmęczenie psychiczne (29,76%) oraz trudności emocjonalne, takie jak lęk i smutek (16,67%), są najbardziej znaczące. Tradycyjna edukacja wykazuje także niewielki odsetek przeciążenia sensorycznego i upośledzonej koncentracji (15,48%), co sugeruje, że czynniki takie jak intensywność programu nauczania mogą wpływać na zdrowie psychiczne uczniów.

Podsumowując, technologie immersyjne w edukacji medycznej, takie jak VR i AR/MR, wprowadzają zaawansowane możliwości uczenia się, ale również wyjątkowe wyzwania związane ze zdrowiem psychicznym. Tradycyjna edukacja, choć prostsza technologicznie, niesie ze sobą własne wyzwania, podkreślając znaczenie zrozumienia i zajęcia się psychologicznymi skutkami każdej metody edukacyjnej. Wyniki tego badania oferują wnikliwe obserwacje na temat skuteczności i recepcji różnych metod nauczania w dziedzinie edukacji medycznej. Badanie porównania tradycyjne metody nauczania z pojawiającymi się metodami opartymi na technologii 3D ma na celu rzucenie światła na przyszły kierunek edukacji medycznej i potencjalną rolę technologii w poprawie wyników uczenia się. Rzeczywistość wirtualna (VR), rzeczywistość rozszerzona (AR) i rzeczywistość mieszana (MR) uzyskały znacznie wyższe wyniki pod względem zaangażowania i immersji w porównaniu z tradycyjnymi metodami nauczania. Trójwymiarowa natura tych technologii oferuje uczniom unikalne, praktyczne doświadczenie edukacyjne, pozwalające na głębsze zrozumienie złożonych scenariuszy medycznych. Pomimo postępu technologicznego, tradycyjne nauczanie, wykorzystujące 75-calowy ekran multimedialny 2D, nadal miało swoje zalety. Niektórzy uczestnicy uznali to za mniej przytłaczające i bardziej zgodne z ich

wcześniejszymi doświadczeniami edukacyjnymi. Znaczna liczba uczniów zgłaszała jednak sporadyczne usterki techniczne podczas korzystania z VR, AR i MR. Te problemy techniczne czasami powodowały frustrację i przerwy w procesie uczenia się. Korzystanie z technologii 3D, choć angażujące, wiązało się z pewnymi problemami zdrowotnymi. Niektórzy studenci zgłaszali objawy, takie jak nudności, zawroty głowy i przeciążenie sensoryczne po długotrwałej ekspozycji. Z drugiej strony, tradycyjne metody miały znikome dolegliwości zdrowotne. Podczas gdy immersyjny charakter technologii 3D był chwalony za współczynnik zaangażowania, nie było znaczącej różnicy w długoterminowym przechowywaniu informacji w porównaniu z tradycyjnymi metodami. Jednak uczenie się przez doświadczenie zapewniane przez VR, AR i MR uznano za korzystne w zrozumieniu złożonych struktur anatomicznych i scenariuszy medycznych. Dane demograficzne dotyczące wieku i płci nie wykazały znaczącej różnicy w preferencjach lub skuteczności technologii, co wskazuje, że wpływ tych metod nauczania jest w dużej mierze uniwersalny wśród studentów medycyny. Podsumowując, chociaż technologie 3D, takie jak VR, AR i MR, zapewniają świeże, wciągające i angażujące podejście do edukacji medycznej, konieczne jest zachowanie równowagi. Sprostanie wyzwaniom technologicznym i problemom zdrowotnym będzie miało kluczowe znaczenie, ponieważ będziemy dalej integrować te metody z programem nauczania. Tradycyjne nauczanie, z udokumentowanymi osiągnięciami, pozostaje istotną częścią edukacji medycznej, podkreślając potrzebę podejścia opartego na nauczaniu mieszanym w przyszłości.

6

EDUKACJA PACJENTA W DOBIE TECHNOLOGII IMMERSYJNYCH

W erze dynamicznego rozwoju technologicznego, edukacja pacjenta staje się coraz bardziej złożona i zaawansowana. Technologie immersyjne, takie jak rzeczywistość wirtualna (VR), rozszerzona rzeczywistość (AR) oraz rzeczywistość mieszana (MR), wprowadzają rewolucyjne zmiany w sposobie, w jaki pacjenci są informowani i angażowani w proces leczenia [48].

Rzeczywistość wirtualna (VR) oferuje unikalne możliwości w zakresie edukacji pacjenta. Dzięki VR pacjenci mogą przenieść się do wirtualnych środowisk, które symulują różnorodne scenariusze medyczne. Na przykład pacjenci z cukrzycą mogą uczestniczyć w interaktywnych sesjach, które pokazują, jak różne czynniki, takie jak dieta i aktywność fizyczna, wpływają na poziom cukru we krwi. Tego typu doświadczenia mogą pomóc pacjentom lepiej zrozumieć ich stan zdrowia i nauczyć się, jak skutecznie zarządzać swoją chorobą. VR może również służyć jako narzędzie do redukcji lęku przed procedurami medycznymi. Pacjenci

mogą korzystać z wirtualnych symulacji, aby zapoznać się z przebiegiem operacji lub innych procedur, co pomaga zminimalizować strach i niepewność. Wirtualne środowiska mogą być dostosowane do indywidualnych potrzeb pacjentów, co sprawia, że edukacja staje się bardziej spersonalizowana i efektywna [49].

Rozszerzona rzeczywistość (AR) wprowadza dodatkowe warstwy informacji do rzeczywistego świata, co jest niezwykle pomocne w edukacji pacjenta. Za pomocą AR lekarze mogą na bieżąco prezentować pacjentom wizualizacje anatomiczne podczas konsultacji, na przykład lekarz może użyć AR do pokazania pacjentowi, jak wygląda jego serce i jak postępuje choroba wieńcowa. Tego typu wizualizacje są bardziej zrozumiałe i angażujące niż tradycyjne metody edukacyjne, takie jak rysunki czy modele anatomiczne. AR może również wspierać pacjentów w codziennym zarządzaniu zdrowiem. Aplikacje AR mogą dostarczać pacjentom instrukcji dotyczących wykonywania ćwiczeń rehabilitacyjnych, monitorować postępy i dostosowywać programy ćwiczeń w czasie rzeczywistym. Dzięki temu pacjenci mają dostęp do ciągłego wsparcia, co zwiększa skuteczność terapii i motywację do jej kontynuowania [50].

Rzeczywistość mieszana (MR) łączy elementy VR i AR, oferując jeszcze bardziej zaawansowane możliwości edukacyjne. MR pozwala na interakcję z wirtualnymi obiektami w rzeczywistym otoczeniu, co może być niezwykle przydatne w edukacji pacjenta. Na przykład pacjenci po operacjach ortopedycznych mogą korzystać z MR do nauki poprawnych technik chodzenia z użyciem protez, widząc jednocześnie swoje ruchy i wirtualne wskazówki w czasie rzeczywistym. MR może również wspierać telemedycynę, umożliwiając lekarzom zdalne prowadzenie konsultacji z pacjentami, podczas których mogą oni wspólnie pracować nad planem leczenia. Pacjenci mogą zobaczyć wirtualne modele

swojego ciała, na których lekarz wyjaśnia poszczególne aspekty terapii, co zwiększa zrozumienie i zaangażowanie pacjenta.

Nasze badania nad technologiami immersyjnymi w edukacji medycznej pozwoliły na zebranie informacji, które mogą być zastosowane również w kontekście edukacji pacjentów. Technologie takie jak rzeczywistość wirtualna (VR), rozszerzona rzeczywistość (AR) i rzeczywistość mieszana (MR) mogą znacząco poprawić sposób, w jaki pacjenci są informowani o swoich stanach zdrowia, procedurach medycznych i sposobach zarządzania chorobami. Przeprowadzane przez nas badania i zdobyte doświadczenia dostarczają cennych wskazówek dotyczących skutecznego wykorzystania tych technologii. Badania wykazały, że technologie immersyjne, takie jak VR, mogą skutecznie zwiększać zaangażowanie i zrozumienie wśród pacjentów. Pacjenci, którzy mieli możliwość korzystania z VR, mogli bardziej realistycznie zobaczyć i zrozumieć swoje schorzenia oraz planowane procedury medyczne. Na przykład pacjenci z chorobami serca mogli za pomocą VR oglądać szczegółowe wizualizacje anatomiczne swojego serca, co pomagało im lepiej zrozumieć, jak wygląda ich stan zdrowia i jakie interwencje są planowane. To z kolei prowadziło do większego zaangażowania pacjentów w proces leczenia i lepszego przestrzegania zaleceń lekarzy.

Jednym z kluczowych wniosków z naszych badań jest to, że technologie immersyjne mogą również znacząco zmniejszyć lęk i stres związany z procedurami medycznymi. Wirtualne symulacje, które pokazywały krok po kroku, jak będzie przebiegać operacja czy inna interwencja medyczna, pomagały pacjentom oswoić się z procesem i zredukować obawy. Pacjenci, którzy korzystali z takich symulacji, zgłaszali, że czują się bardziej przygotowani i spokojni przed zabiegiem. To podejście może być szczególnie korzystne dla dzieci, które często odczuwają większy lęk przed medycznymi interwencjami. Rozszerzona rzeczywistość (AR)

i rzeczywistość mieszana (MR) również oferują znaczne korzyści w edukacji pacjentów. Dzięki AR pacjenci mogą na przykład zobaczyć, jak stosować opatrunki czy wykonywać ćwiczenia rehabilitacyjne w domu, co zwiększa ich samodzielność i skuteczność leczenia. Nasze badania pokazują, że wizualne wskazówki dostarczane w czasie rzeczywistym za pomocą AR mogą być bardziej zrozumiałe i łatwiejsze do naśladowania niż tradycyjne instrukcje pisemne lub werbalne.

Jednakże, pomimo licznych zalet, technologie immersyjne niosą ze sobą również pewne wyzwania, które należy uwzględnić w edukacji pacjentów. Wysokie koszty sprzętu i oprogramowania mogą stanowić barierę dla szerokiego wdrożenia tych technologii w placówkach medycznych. Ponadto nie wszyscy pacjenci są zaznajomieni z nowoczesnymi technologiami, co może wymagać dodatkowego wsparcia i szkoleń. W naszych badaniach zauważyliśmy również, że długotrwałe korzystanie z VR może prowadzić do zmęczenia wzroku i dezorientacji, dlatego ważne jest, aby sesje były odpowiednio zarządzane i nie trwały zbyt długo.

Technologie immersyjne, takie jak rzeczywistość wirtualna (VR), rozszerzona rzeczywistość (AR) oraz rzeczywistość mieszana (MR), oferują pacjentom unikalne doświadczenia edukacyjne i terapeutyczne. Te technologie, mimo że mają wiele zalet, mogą również wpływać na psychologiczne doznania pacjentów. Poniżej opisano szczegółowo potencjalne psychologiczne negatywne doznania pacjentów związane z użyciem tych technologii, które należy zawsze brać pod uwagę, wdrażając zastosowanie tych technologii w edukacji pacjentów.

Technologie immersyjne, zwłaszcza VR, intensywnie angażują zmysły pacjentów, co może prowadzić do przeciążenia sensorycznego. Pacjenci mogą doświadczać uczucia zmęczenia psychicznego i fizycznego, które jest wynikiem nadmiernej stymulacji wizualnej i dźwiękowej. Przeciążenie sensoryczne może objawiać się trudnościami w koncentracji, bólem

głowy, a także zmęczeniem oczu. Pacjenci, którzy nie są przyzwyczajeni do intensywnych bodźców, mogą czuć się przytłoczeni i zmęczeni nawet po krótkich sesjach korzystania z VR. Korzystanie z VR może prowadzić również do uczucia dezorientacji przestrzennej, co jest wynikiem immersji w wirtualne środowisko, które zniekształca percepcję rzeczywistego świata. Pacjenci mogą czuć się zagubieni lub zdezorientowani po zakończeniu sesji VR, co może prowadzić do chwilowej utraty orientacji. Depersonalizacja, czyli uczucie oddzielenia od własnego ciała, również może wystąpić podczas intensywnych sesji VR. Pacjenci mogą odczuwać, że ich ciało jest nierzeczywiste lub że są oddzieleni od swoich fizycznych odczuć [51]. Technologie immersyjne, mimo że mogą być używane do redukcji lęku, mogą również wywoływać stres i niepokój u niektórych pacjentów. Realistyczne symulacje medyczne w VR mogą być zbyt intensywne i wywoływać silne emocje, zwłaszcza w przypadku pacjentów z wrażliwą psychiką. Na przykład symulacje operacji lub sytuacji nagłych mogą wywoływać lęk i niepokój związany z procedurami medycznymi, nawet jeśli pacjenci są świadomi, że znajdują się w wirtualnym środowisku. Ponieważ symulacje te mogą być niezwykle realistyczne, niesie to ryzyko nadmiernej ekspozycji na traumatyczne treści. Pacjenci mogą być narażeni na realistyczne symulacje medyczne, które mogą być psychologicznie obciążające, zwłaszcza w kontekście trudnych i traumatycznych scenariuszy. Konieczne jest staranne projektowanie symulacji i monitorowanie reakcji pacjentów, aby upewnić się, że treści nie wywołują niepotrzebnego stresu czy traumy. Długotrwałe sesje korzystania z technologii immersyjnych mogą prowadzić do uczucia oddzielenia od rzeczywistości. Pacjenci mogą mieć trudności z powrotem do rzeczywistego świata po intensywnych doświadczeniach VR, co może prowadzić do uczucia dezorientacji i niepewności. To oddzielenie od rzeczywistości może być szczególnie problematyczne

dla pacjentów z problemami zdrowia psychicznego, takimi jak lęki czy depresja, ponieważ może pogłębiać ich symptomy. Intensywne korzystanie z technologii immersyjnych może prowadzić do zmęczenia psychicznego, które jest wynikiem ciągłej koncentracji i angażowania wielu zmysłów jednocześnie. Pacjenci mogą odczuwać wyczerpanie umysłowe po sesjach VR lub AR, co może wpływać na ich zdolność do wykonywania codziennych czynności. Regularne przerwy i ograniczenie czasu spędzanego w wirtualnych środowiskach mogą pomóc w zmniejszeniu tego uczucia zmęczenia. Choć technologie immersyjne oferują bogate i interaktywne doświadczenia, mogą również prowadzić do izolacji społecznej. Pacjenci, którzy spędzają dużo czasu w wirtualnych środowiskach, mogą czuć się odizolowani od swoich bliskich i rzeczywistego świata. To uczucie izolacji może być szczególnie wyraźne u pacjentów, którzy używają technologii immersyjnych jako głównego źródła interakcji społecznych, co może prowadzić do problemów z relacjami międzyludzkimi i samotności. Warto również przypomnieć, że intensywne sesje korzystania z technologii immersyjnych mogą wpływać na jakość snu pacjentów. Pacjenci mogą doświadczać problemów ze snem, takich jak trudności z zasypianiem czy przerywany sen, co może być wynikiem nadmiernej stymulacji mózgu. Regularne przerwy i unikanie korzystania z VR przed snem mogą pomóc w złagodzeniu tych problemów.

Aby zminimalizować negatywne efekty psychologiczne związane z korzystaniem z technologii immersyjnych, ważne jest wdrożenie odpowiednich strategii. Pacjenci powinni być zachęcani do regularnych przerw podczas sesji VR, AR i MR, aby zmniejszyć zmęczenie psychiczne i przeciążenie sensoryczne. Ważne jest również zapewnienie wsparcia psychologicznego dla pacjentów, które pomoże im radzić sobie z ewentualnym stresem i lękiem. Dostosowanie ergonomii stanowiska pracy i promowanie zdrowych nawyków, takich jak regularne ćwiczenia i odpowiednia

higiena snu, mogą również pomóc w łagodzeniu negatywnych skutków. Ponadto konieczne jest staranne projektowanie symulacji, aby unikać nadmiernej ekspozycji na traumatyczne treści, a także integracja technologii immersyjnych z tradycyjnymi formami edukacji i wsparcia, aby zapewnić zrównoważone i holistyczne podejście do edukacji pacjentów.

Nasze doświadczenia pokazują, że kluczowym elementem sukcesu w edukacji pacjentów z wykorzystaniem technologii immersyjnych jest integracja tych narzędzi z tradycyjnymi metodami edukacyjnymi. Pacjenci powinni mieć możliwość korzystania z VR, AR i MR jako uzupełnienia do rozmów z lekarzami, materiałów pisemnych i innych tradycyjnych form edukacji. Takie holistyczne podejście zapewnia lepsze zrozumienie i zaangażowanie pacjentów, jednocześnie minimalizując potencjalne negatywne skutki technologii.

Podsumowując, nasze badania nad technologiami immersyjnymi w edukacji medycznej dostarczają cennych wskazówek, które mogą być zastosowane w edukacji pacjentów. VR, AR i MR mają potencjał, aby znacząco poprawić zrozumienie i zaangażowanie pacjentów w proces leczenia, zmniejszyć lęk i stres związany z procedurami medycznymi oraz zwiększyć skuteczność samodzielnego zarządzania zdrowiem. Jednakże, aby w pełni wykorzystać te możliwości, konieczne jest uwzględnienie wyzwań związanych z kosztami, dostępnością i potencjalnymi skutkami ubocznymi, a także integracja nowych technologii z tradycyjnymi metodami edukacyjnymi. Pomimo licznych zalet technologie immersyjne w edukacji pacjenta wiążą się z pewnymi wyzwaniami. Wysokie koszty wdrożenia i utrzymania tych technologii mogą stanowić barierę dla wielu placówek medycznych. Ponadto niektórzy pacjenci mogą mieć trudności z adaptacją do nowych technologii, co wymaga dodatkowych szkoleń i wsparcia. Jednak przyszłość edukacji pacjenta z wykorzystaniem technologii immersyjnych wydaje się obiecująca. Ciągły rozwój

technologiczny oraz rosnąca dostępność sprzętu VR, AR i MR sprawiają, że te innowacyjne metody stają się coraz bardziej powszechne. W miarę jak technologie te będą się rozwijać, ich zastosowanie w edukacji pacjenta będzie coraz bardziej zaawansowane i skuteczne. Technologie immersyjne mają potencjał, aby znacząco poprawić edukację pacjenta, czyniąc ją bardziej angażującą, spersonalizowaną i efektywną. Kluczem do sukcesu będzie jednak umiejętne wykorzystanie tych narzędzi oraz pokonanie związanych z nimi wyzwań, aby zapewnić pacjentom najlepszą możliwą opiekę i wsparcie.



TRÓJWYMIAROWA SALA OPERACYJNA

W niektórych przypadkach interakcja z trójwymiarowym światem nie jest konieczna, wystarczy trójwymiarowa rekonstrukcja środowiska do monitorowania pola widzenia chirurgów podczas realistycznych zadań chirurgicznych [52]. Użyteczność i efektywność narzędzia „wirtualnego ducha”, które obserwuje salę operacyjną z określonej perspektywy, można ocenić na podstawie obiektywnych wskaźników wydajności operatorów, takich jak ruchy rąk i ciała, co może mieć wartość dydaktyczną. W takim celu przetestowaliśmy użycie kamery 3D (na przykład Azure Kinect SDK) do stworzenia wysokiej rozdzielczości mapowania trójwymiarowego obszaru chirurgicznego [35]. Wysoka rozdzielczość przestrzenna jest kluczowa w zastosowaniach takich jak śledzenie w czasie rzeczywistym narzędzi chirurgicznych czy nakładanie rozszerzonych danych na ciało pacjenta. Czujnik głębokości może precyzyjnie uchwycić kontury i wymiary pola chirurgicznego, umożliwiając dokładne dopasowanie obiektów wirtualnych do rzeczywistości. Te możliwości są

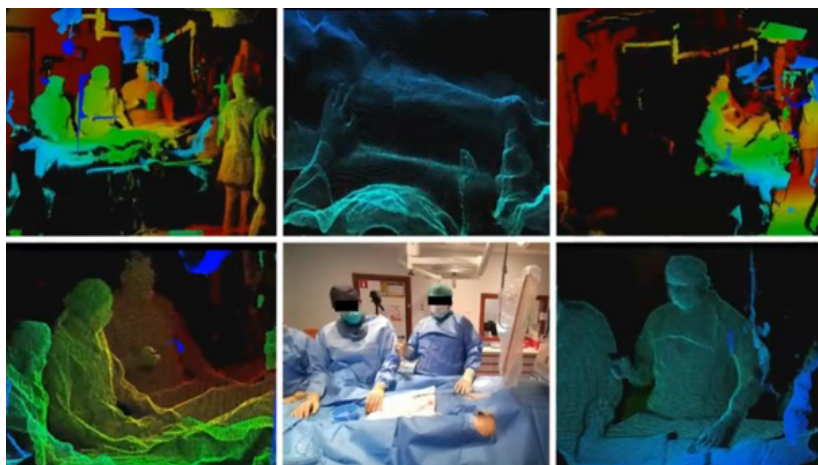
szczególnie przydatne w przypadku bezdotykowych interakcji opartych na gestach w sterylnych środowiskach [53].

Interdyscyplinarny zespół, w skład którego wchodzi bioinżynierowie i lekarze, może przetestować predefiniowane gesty do manipulowania obrazami medycznymi 3D i dostępu do danych pacjenta, zachowując sterylność pola operacyjnego. To podejście, oparte na rozpoznawaniu przestrzeni i gestów oraz wsparte przez chmurę obliczeniową, otwiera nowe możliwości monitorowania procedur chirurgicznych. Dzięki mapowaniu przestrzeni 3D w sali operacyjnej i umieszczeniu jej w środowisku immersyjnym możemy dodawać informacje związane z pacjentem, zarówno te dotyczące zmian fizjologicznych w czasie, jak i te związane z ich anatomią. Dodatkowo pozwala to na integrację retrospektywnych i rzeczywistych danych pacjenta w jednej przestrzeni 3D przy wsparciu technologii immersyjnych. Aby proces ten był precyzyjny i dokładny, należy zebrać i odpowiednio przygotować dane kliniczne pacjenta.

Technologie mieszanej rzeczywistości w sali operacyjnej reprezentują nowy etap w metodach proktoringu lub podejściu edukacyjnym. Inni specjaliści mogą oglądać archiwalne nagrania procedury lub obserwować ją na żywo za pomocą odpowiedniego oprogramowania. To podejście do mapowania sali operacyjnej za pomocą kamer 3D wzmacnia doświadczenia z mieszaną rzeczywistością (MR), umożliwiając zdalnym użytkownikom obserwację operacji z różnych perspektyw, bez przeszkadzania operatorom. Widok „wirtualnego ducha” nie byłby na przykład ograniczony przez ręce operatora, co jest szczególnie istotne w edukacji studentów medycyny i stażystów.

To rozwiązanie pozwala na teoretycznie nieograniczoną liczbę uczestników w sali operacyjnej 3D, ponieważ rozmiar pokoju nie ma znaczenia i operatorzy nie są rozpraszani. Operację można nagrać, a następnie przejrzeć i wykorzystać do edukacji personelu medycznego, z dodatkowymi

funkcjami, takimi jak zdalne wskazywanie obiektów w przestrzeni, co jest szczególnie przydatne w trudnych lub rzadkich przypadkach. Każda procedura może być nagrana i przedstawiona jako samouczek do celów edukacyjnych. Ponadto technologia ta dostarcza bardzo użyteczne narzędzie do konsultacji w czasie rzeczywistym podczas trwającej operacji. Operujący chirurg może zdalnie poprosić bardziej doświadczonych kolegów o zbadanie i konsultację przypadku z perspektywy chirurga. Dodatkowo informacje kliniczne o pacjencie mogą być wyświetlane w przestrzeni mieszanej rzeczywistości [53].



Rys. 15. Holograficzny asystent medyczny a) widok trójwymiarowej sali operacyjnej w technologii immersyjnej [54].

8

PROBLEMY Z BEZPIECZEŃSTWEM DANYCH ZWIĄZANE Z METAVERSE

Zacznijmy od zdefiniowania, czym jest metaverse [55]. Metaverse to alternatywny świat cyfrowy, do którego można uzyskać dostęp za pomocą przeznaczonych do tego urządzeń audiowizualnych. W tym równoległym świecie spotykają się różne formy sztucznej inteligencji, w tym osoby w postaci cyfrowych bliźniaków (awatarów) zdolne do interakcji społecznych. Metaverse w medycynie może być wykorzystywany w różny sposób, na przykład poprzez przeprowadzenie operacji na odległość tysięcy kilometrów, gdzie chirurg mógłby na żywo śledzić dane kliniczne pacjenta, w tym obrazy diagnostyczne (wirtualny proktoring). Metaverse może być również wyjątkowym narzędziem edukacyjnym, oferującym interaktywne lekcje cyfrowe, umożliwiającym szczegółowe badanie anatomii, nawigowanie w jej wnętrzu, naukę, obserwację rozwoju procesów patologicznych oraz symulowanie zabiegów chirurgicznych lub medycznych na wirtualnych pacjentach. Chociaż sztuczna inteligencja jest już powszechnie stosowana w praktyce klinicznej, metaverse jest

jeszcze w początkowej fazie rozwoju. Aby określić jego potencjalną użyteczność i niezawodność, potrzebne są dalsze postępy technologiczne [56]. Podsumowując, metaverse jest kompleksową wirtualną przestrzenią wykorzystującą technologie immersyjne, takie jak VR, AR i MR czy sztuczną inteligencję, aby stworzyć głęboko interaktywne i wciągające doświadczenia dla użytkowników [57]. W czasach dynamicznego rozwoju technologii cyfrowych, takich jak sztuczna inteligencja, metaverse i cyfrowe bliźniaki, kluczowym pytaniem staje się kwestia bezpieczeństwa danych, co ma szczególne znaczenie w medycynie [58]. W odpowiedzi na te wyzwania opracowano nowe metody, takie jak zarządzanie zaufaniem, ryzykiem i bezpieczeństwem AI (AI TRiSM) [59]. Ramy te pozwalają na ocenę systemów opartych na AI według określonych kryteriów, w tym zgodności, sprawiedliwości, niezawodności oraz ochrony prywatności danych [60]. Bezpieczeństwo danych w systemach AI jest bardzo złożone i obejmuje bezpieczeństwo projektowania systemów, testowanie modeli, aplikacje, zgodność z przepisami, infrastrukturę oraz audyt etyczny. W związku z tym dane medyczne mogą być narażone na ataki zarówno pasywne, jak i aktywne. Systemy medyczne, takie jak implantowalne urządzenia i noszone urządzenia internetowe, są szczególnie podatne na ataki, co sprawia, że ich ochrona jest kluczowa. W takich systemach istotne jest zapewnienie uwierzytelniania, dostępności, integralności, niezaprzeczalności i poufności danych. Aby zmniejszyć ryzyko wycieku wrażliwych informacji o pacjentach, stosuje się proces anonimizacji, który ma na celu uniemożliwienie identyfikacji pacjentów na podstawie ich dokumentacji medycznej. Najczęściej wykorzystywaną metodą jest pseudonimizacja, polegająca na zastępowaniu bezpośrednich identyfikatorów kodami pseudonimowymi. Jeśli chodzi o bezpieczeństwo systemów informacyjnych w medycynie, wiele rozwiązań opiera się na technologii blockchain, która wykorzystuje zaawansowane metody

szyfrowania i uwierzytelniania. Dodatkowo wprowadzono koncepcję przechowywania i dystrybucji wrażliwych danych wśród wielu węzłów chmurowych z wykorzystaniem szyfrowania opartego na kwantowych głębokich sieciach neuronowych, co zapewnia lepszy wskaźnik wykrywalności niż tradycyjne metody. Wszystkie systemy medyczne przetwarzające i przechowujące wrażliwe dane osobowe muszą być zgodne z europejskim ogólnym rozporządzeniem o ochronie danych (GDPR) oraz amerykańską ustawą o ochronie prywatności konsumentów w Kalifornii (CCPA). Jednak różnice w przepisach pomiędzy Europą a USA utrudniają wymianę wrażliwych informacji o pacjentach bez odpowiednich zabezpieczeń instytucjonalnych. Systemy oparte na technologii XR również oferują dobre rozwiązania w zakresie ochrony prywatności pacjentów.

W dziedzinie medycyny metaversum jest rozpatrywane zarówno jako ogólna przestrzeń, w której zachowanie praktyków medycznych korzystających z technologii takich jak VR, AR i MR podlega podobnym kwestiom etycznym i zagrożeniom jak inne wirtualne środowiska, na przykład gry online, jak i jako specyficzna przestrzeń, gdzie te technologie są używane do rozwijania i wdrażania praktyk leczniczych dla określonych schorzeń, na przykład związanych z kardiologią. W pierwszym przypadku pojawiają się kwestie etyczne, takie jak równowaga moralna. Grinbaum [61] zastanawia się, czy zachowanie w metaversum powinno być oceniane według wartości rzeczywistego świata, czy też istnieją unikalne aspekty wirtualnego zachowania: jak traktować osoby, które przyjmują różne osobowości, gdy te osobowości zachowują się niewłaściwie w różnoraki sposób? Te przekonania mogą się rozwijać wraz z życiem aktora w wirtualnym świecie, co skutkuje propozycjami ogólnych kodeksów postępowania. Wczesne próby ustanowienia etycznych kodeksów postępowania jako praktycznych wytycznych dla ludzi operujących awatarami w metaversum zostały już podjęte. Heider

[62] proponuje kodeks etyczny dla osób działających w metaversum przez ich awatary, zawierający siedem punktów: okazuj szacunek, mów prawdę, nie krzywdź, okazuj troskę, pracuj dla dobra, demonstruj tolerancję i szanuj prywatność. Jednak tylko dwa z tych punktów dotyczą specyficznego zachowania, które jest jakościowo inne niż w świecie fizycznym, podkreślając dwie kluczowe różnice: możliwość posiadania więcej niż jednego awatara o różnych wyglądach i przyjmowanie przez nie różnych ról. W kontekście metaversum jako specyficznej przestrzeni, lekarze będą używać określonych technologii metaversum do leczenia niektórych chorób i schorzeń, gdzie istnieje kontrast między narzędziem lub zestawem narzędzi zaprojektowanych do wykonania zadania a ogólnym środowiskiem, w którym mogą istnieć wirtualni agenci [63]. Jednak w obu ujęciach metaversum występują podobne problemy etyczne: cechy ludzkie kształtują zachowanie, postawy i użytkowanie. Zastosowanie Cyfrowych Bliźniaków (Digital Twin) stało się kluczowe w praktyce medycznej, obejmując dziedziny od badań klinicznych po interwencje lecznicze, edukację medyczną i modelowanie scenariuszy. W tych przypadkach dwa podstawowe pojęcia metaversum są kluczowe: środowisko i zestaw narzędzi oraz kwestie reprezentacji. Braun [64] porusza problem, jak osoba ma być reprezentowana przez swojego DT pod względem dokładności i kontroli, kto będzie miał władzę nad kontrolą DT i jak. Pojawiają się również kwestie ochrony dzieci i grup wrażliwych. Cyfrowe Bliźniaki umożliwiają generowanie ogromnych ilości danych. Cyfrowe bliźnięta obejmują wirtualne modelowanie różnych typów obiektów i zjawisk rzeczywistego świata, od ludzi po urządzenia, cechy środowiskowe i instytucje (jak kliniki) połączone za pomocą strumieni danych wykorzystywanych nie tylko podczas interwencji leczniczych, ale także w projektowaniu badań klinicznych i edukacji medycznej. Produkcja danych podczas leczenia (czy to szybkich interwencji ratunkowych, czy

wolnego monitorowania serca) może być wykorzystywana do informowania pacjentów o wyborze leczenia, podejmowania decyzji finansowych, a nawet ustalania składek ubezpieczeniowych. Jednak pojęcie jasno zdefiniowanego zbioru danych staje się kwestionowane, gdy rozważana jest podróż danych: dane mogą być modyfikowane w trakcie ich transferu, co prowadzi do etycznych kontrowersji. Istnieją również kwestie bezpieczeństwa i prywatności, cech danych (selekcja, zbieranie, kategoryzacja i wykorzystanie), własności oraz praw do użytkowania i dostępu, które stanowią punkty ryzyka. Zaniedbanie tych kwestii może ograniczyć możliwość zgłaszania roszczeń ubezpieczeniowych lub odpowiedzialności w przypadku błędu medycznego. Obecnie jednak brakuje w tych modelach wymiarów etycznych, obejmujących własność i kontrolę danych, ludzki wpływ DT na człowieka oraz prawa interesariuszy. Aby DT były skuteczne, potrzebują integracji fizycznej, wirtualnej, etycznej i połączenia danych. Zaniedbanie strony etycznej może stanowić największe zagrożenie dla rozwoju technologii DT, zwłaszcza w kardiologii. Konieczne jest, aby DT były wyjaśniane w ramach Explainable AI (XAI) i aby były godne zaufania w ramach Trustworthy AI (TAI) [65]. Brak rozwoju w tych obszarach może opóźnić postęp techniczny z powodu etycznych obiekcji. Czynniki te można uwzględnić na różnych poziomach, czy to jako zintegrowane w konkretne systemy, lokalne polityki, czy też w krajowe i międzynarodowe regulacje [66].

PODSUMOWANIE

Prezentowane technologie tworzą interaktywne i immersyjne środowiska, metaversum, pozwalając studentom oraz profesjonalistom medycznym na interakcję z wirtualnym cyfrowym pacjentem w sposób, który naśladuje sytuacje z rzeczywistości. Poprzez wykorzystanie przedstawionych technologii można diagnozować wirtualnego pacjenta, doskonaląc swoje umiejętności w bezpiecznym i kontrolowanym otoczeniu. W trójwymiarowym środowisku immersyjnym możliwe jest planowanie leczenia w sposób interaktywny, a nawet zdalny poprzez łączenie w wirtualnym pokoju uczestników z różnych położen geograficznych. Wielu członków zespołu może eksplorować i zanurzać się w przestrzeni immersyjnej, mając możliwość oceny opcji leczenia, procedur chirurgicznych czy potencjalnych wyników, co prowadzi do bardziej przemyślanych i precyzyjnych planów leczenia. Dodatkowo wirtualni pacjenci są nieocenieni w edukacji medycznej. W obecnej dobie cyfryzacji edukacja pacjentów przy wykorzystaniu technologii immersyjnych wydaje się jedną z możliwych opcji. Łagodzenie lęków przedoperacyjnych, przed dedykowanymi terapiami czy edukacja pacjentów, zarówno w zrozumieniu diagnostyki klinicznej, jak i terapii, jest niesamowicie istotna. Możliwości edukacji pacjentów możemy rozważyć na przykładzie pacjentów onkologicznych. U takich pacjentów stres przedoperacyjny wiąże się ze zwiększonym odsetkiem powikłań pooperacyjnych. Mniejsza edukacja i świadomość w kwestiach medycznych mogą przyczyniać się do wyższego poziomu stresu, który można zmniejszyć poprzez edukację. Edukacja pacjentów staje się coraz ważniejszym elementem opieki zdrowotnej. Przyszłe projekty badawcze będą dążyć do pełnej automatyzacji procesu segmentacji, aby skrócić czas potrzebny na stworzenie modeli 3D. Lekarze zaproponują pacjentom udział w badaniu podczas

wizyt przedoperacyjnych, podając dane kontaktowe koordynatorów badania. Poprzez wykorzystanie wirtualnego pacjenta możemy wizualizować oraz symulować proces diagnostyki, leczenia i terapii począwszy od diagnozy aż po ocenę po leczeniu, promując medycynę opartą na dowodach i ciągle doskonalenie opieki nad pacjentem. I na koniec w kontekście elektronicznych kartotek pacjentów (EHR – an electronic health record) i algorytmów sztucznej inteligencji: integracja danych medycznych z nowymi technologiami wzbogaca realizm i zdolności predykcyjne w tworzeniu wirtualnych pacjentów. Sztuczna inteligencja może generować dynamiczne odpowiedzi i dostosowywać warunki wirtualnego pacjenta na podstawie danych z rzeczywistego świata. A aspekty etyczne odgrywają kluczową rolę w ochronie poufności danych pacjentów i zapewnieniu odpowiedniego i odpowiedzialnego wykorzystania informacji o wirtualnych pacjentach.

Rozszerzona Rzeczywistość Medyczna (MXR), obejmująca rzeczywistość rozszerzoną (AR), rzeczywistość wirtualną (VR) i rzeczywistość mieszaną (MR), przedstawia nowy paradygmat w szkoleniu studentów i personelu medycznego, oferując immersyjne, interaktywne i realistyczne doświadczenia edukacyjne w opiece zdrowotnej. Choć tradycyjne narzędzia edukacyjne w medycynie są niezbędne, konieczne jest wykorzystanie innowacyjnych i rozwijających się zastosowań edukacyjnych technologii XR. Na najbardziej podstawowym poziomie nauki anatomii XR był szeroko wykorzystywany, ze szczególnym uwzględnieniem jego przewagi nad konwencjonalnymi metodami nauczania – zwłaszcza w zakresie rozumienia przestrzennego i zapamiętywania. W przypadku interpretacji obrazów XR wspiera koncepcję wirtualnych pokoi do odczytu, umożliwiając tworzenie środowiska do wspólnej nauki oraz zwiększając analizę i zrozumienie obrazów. Co więcej, interwencje z użyciem obrazowania w radiologii interwencyjnej odnotowały wzrost wykorzystania XR,

co ilustruje jego skuteczność w szkoleniu proceduralnym i zdobywaniu umiejętności przez studentów medycyny i rezydentów w bezpiecznym i pozbawionym ryzyka środowisku. Jednakże wciąż istnieje wiele wyzwań i ograniczeń związanych z XR w edukacji radiologicznej, w tym technologiczne, ekonomiczne, ergonomiczne oraz związane z integracją w istniejących programach nauczania. Potencjał MXR w edukacji i szkoleniu radiologicznym wraz ze wglądem w przyszłość XR w edukacji radiologicznej, prognozują postępy w immersyjnych symulacjach i integracji AI dla spersonalizowanego uczenia oraz potencjałe platform XR opartych na chmurze dla zdalnego i wspólnego szkolenia. Podsumowując, rozwijająca się rola MXR w przekształcaniu edukacji medycznej oferuje bezpieczniejszy, skalowalny i bardziej efektywny model szkoleniowy, który dostosowuje się do dynamicznego krajobrazu opieki zdrowotnej.

Acknowledgments

Dla: Piotra Waleckiego, Petera van Dama, Jana Zapały, Grażyny Wy-
szyńskiej-Pawelec, Marcina Bobera, Damiana Dołęgi-Dołęgowskiego,
Joanny Cieślik, Pawła Dobosza, Pawła Ozgi, Jerzego Tomika, Tomasza
Tokarka, Pawła Matusika, Danily Potyagaylo, Agnieszki Pręgowskiej,
Andrew Atkinsona, Haliny Dobrzynski, Radka Koleckiego, Antoniego
Szczepanika, Tomasza Roguli, Jakuba Keniga, Anny Grochowskiej, Na-
talii Plawiak, Piotra Richtera.

Funding:

„Publikacja tej książki była możliwa dzięki wsparciu finansowemu
z grantu No. LIDER/17/0064/L-11/19/NCBR/2020, który pokrył koszty
związane z jej napisaniem i wydaniem”.

1. Lang, M., et al., *Medical Extended Reality for Radiology Education and Training*. J Am Coll Radiol, 2024.
2. *Sensorama*. Available from: <https://en.wikipedia.org/wiki/Sensorama>.
3. *Sesorama*. 1962
4. Lanier, J. and F. Biocca, *An Insider's View of the Future of Virtual Reality*. Journal of Communication, 2006. **42**(4): p. 150-172.
5. *Class VR*. Available from: <https://www.classvr.com/us/>.
6. *Meta*. Available from: <https://www.meta.com/nl-nl/experiences/2532035600194083/>.
7. *Ready Player One*. Available from: [https://en.wikipedia.org/wiki/Ready_Player_One_\(film\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Ready_Player_One_(film)).

8. *Sword of Damocles*. Available from: [https://en.wikipedia.org/wiki/The_Sword_of_Damocles_\(virtual_reality\)](https://en.wikipedia.org/wiki/The_Sword_of_Damocles_(virtual_reality)).
9. *Ivan Sutherland and Bob Sproull Create the First Virtual Reality Head Mounted Display System*. Available from: <https://www.historyofinformation.com/detail.php?entryid=1087>.
10. *100 Inspirational Quotes About AR & VR Technology 2024*; Available from: <https://digitaldefynd.com/IQ/inspirational-quotes-about-ar-vr-technology/>.
11. *Metaverse Market Size*. Available from: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/metaverse-market-report>.
12. *Allied Market Research*. Available from: <https://www.alliedmarketresearch.com/mixed-reality-market>.
13. *HoloLens leader Alex Kipman*. Available from: <https://www.geekwire.com/2022/hololens-leader-alex-kipman-to-leave-microsoft-in-reorg-of-mixed-reality-group-after-report-on-toxic-behavior/>.
14. *Microsoft Mesh powers shared experiences in mixed reality*. Available from: <https://news.microsoft.com/source/features/innovation/microsoft-mesh/>.
15. *HoloLens 2 x Healthcare*. Available from: <https://www.microsoft.com/en-us/hololens/industry-healthcare>.
16. Proniewska, K., D. Dolega-Dolegowski, and D. Dudek, *A holographic doctors' assistant on the example of a wireless heart rate monitor*. Bio-Algorithms and Med-Systems, 2018. **14**.
17. Proniewska, K., et al., *8 Holography as a progressive revolution in medicine, in Simulations in Medicine*, R.-K. Irena, Editor. 2020, De Gruyter: Berlin, Boston. p. 103-116.

18. DICOM. Available from: <https://www.dicomstandard.org/>.
19. Bone Grafting and Reconstruction. Available from: <https://www.citadelsurgery.com/oral-surgery/bone-grafting-and-reconstruction.php>.
20. Koyachi, M., et al., *Mixed-reality and computer-aided design/computer-aided manufacturing technology for mandibular reconstruction: a case description*. Quant Imaging Med Surg, 2023. **13**(6): p. 4050-4056.
21. Proniewska, K., A.A. Khokhar, and D. Dudek, *Advanced imaging in interventional cardiology: mixed reality to optimize preprocedural planning and intraprocedural monitoring*. Kardiol Pol, 2021. **79**(3): p. 331-335.
22. Elzbieta Pociask, K.P.M., MHD Jafar Mortada, Klaudia K Proniewska, Peter M van Dam. *Automatic Classification Normal ECGs Based on Normal PathECG and WaveECG Features in Computing in Cardiology*. 2023.
23. 3D slicer. Available from: <https://www.slicer.org/>.
24. Klaudia Proniewska, P.M., Peter van Dam. *Innovative Approach of 3D Electro-anatomical Heart Imaging Enthused by Mixed Reality*.
25. Proniewska, K.K., R. Abacherli, and P.M. van Dam, *The DeltaWaveECG: The differences to the normal 12-lead ECG amplitudes*. J Electrocardiol, 2023. **76**: p. 45-54.
26. CineECG. Available from: <https://cineecg.com/>.
27. Stephenson, R.S., et al., *High resolution 3-Dimensional imaging of the human cardiac conduction system from microanatomy to mathematical modeling*. Sci Rep, 2017. **7**(1): p. 7188.
28. Boonstra, M.J., et al., *CineECG: A novel method to image the average activation sequence in the heart from the 12-lead ECG*.

- Comput Biol Med, 2022. **141**: p. 105128.
29. Locati, E.T., et al., *CineECG provides a novel anatomical view on the normal atrial P-wave*. *Eur Heart J Digit Health*, 2022. **3**(2): p. 169-180.
 30. Baturova, M.A., et al., *Usefulness of Electrocardiographic Left Atrial Abnormality to Predict Response to Cardiac Resynchronization Therapy in Patients With Mild Heart Failure and Left Bundle Branch Block (a Multicenter Automatic Defibrillator Implantation Trial with Cardiac Resynchronization Therapy Substudy)*. *Am J Cardiol*, 2018. **122**(2): p. 268-274.
 31. Wagner, P., et al., *PTB-XL, a large publicly available electrocardiography dataset*. *Sci Data*, 2020. **7**(1): p. 154.
 32. Danila Potyagaylo, P.v.D., Agnieszka Pręgoszka, Andrew Atkinson, Halina Dobrzynski, Damian Dołęga-Dołęgowski and Klaudia Proniewska. *Mixed Reality 3D view of atrial conduction starts from high sinus node part*. Available from: <https://youtu.be/XWxXmVxe4cg>.
 33. Danila Potyagaylo, P.v.D., Agnieszka Pręgoszka, Andrew Atkinson, Halina Dobrzynski, Damian Dołęga-Dołęgowski and Klaudia Proniewska. *Mixed Reality 3D view of atrial conduction starts from low sinus node part*. Available from: <https://youtu.be/rmooQNTMwj4>.
 34. Danila Potyagaylo, P.v.D., Agnieszka Pręgoszka, Andrew Atkinson, Halina Dobrzynski, Damian Dołęga-Dołęgowski and Klaudia Proniewska. *Mixed Reality 3D view of atrial conduction delay via slow propagation through Bachmann's bundle*. Available from: https://youtu.be/6hNwCHyS_qI.
 35. Proniewska, K., et al. *Three-Dimensional Operating Room with Unlimited Perspective*. 2020. Cham: Springer International Publishing.

36. DICOM.
37. Richard Bibb, D.E., Abby Paterson, *Medical Modelling: The Application of Advanced Design and Development Techniques in Medicine*. 1st edition ed. 2006: Woodhead Publishing.
38. Levoy, M., *Display of surfaces from volume data*. IEEE Computer Graphics and Applications, 1988. **8**(3): p. 29-37.
39. Zhang, Q., R. Eagleson, and T.M. Peters, *Volume visualization: a technical overview with a focus on medical applications*. J Digit Imaging, 2011. **24**(4): p. 640-64.
40. Lorensen, W. and H. Cline, *Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm*. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1987. **21**: p. 163.
41. Preim, B. and C.P. Botha, *Visual Computing for Medicine: Theory, Algorithms, and Applications: Second Edition*. Visual Computing for Medicine: Theory, Algorithms, and Applications: Second Edition, 2013: p. 1-812.
42. Garlinska, M., et al., *The Influence of Emerging Technologies on Distance Education*. Electronics, 2023. **12**(7): p. 1550.
43. Laessoe, U., et al., *Motion sickness and cybersickness - Sensory mismatch*. Physiol Behav, 2023. **258**: p. 114015.
44. *HoloAnatomy® Software Suite*. Available from: <https://case.edu/holoanatomy/>.
45. *MRAME – Mixed Reality support Advanced Medical Education – new methods of teaching medical skills*. Available from: <https://mrame.cm-uj.krakow.pl/>.
46. *Projekt Doskonały Uniwersytet. Podniesienie kompetencji zawodowych studentów Wydziału Lekarskiego i Wydziału Nauk o Zdrowiu Uniwersytetu Jagiellońskiego Collegium Medicum.*; Available from: <https://doskonaly.uj.edu.pl/>.

47. Tene, T., et al., *Virtual reality and augmented reality in medical education: an umbrella review*. Front Digit Health, 2024. **6**: p. 1365345.
48. *Medical Economics Journal: Immersive learning: The disruption health care education needed*. Available from: <https://www.medicaleconomics.com/view/immersive-learning-the-disruption-health-care-education-needed>.
49. Snoswell, A.J. and C.L. Snoswell, *Immersive Virtual Reality in Health Care: Systematic Review of Technology and Disease States*. JMIR Biomed Eng, 2019. **4**(1): p. e15025.
50. Tsai, Y.C., et al., *Virtual reality skateboarding training for balance and functional performance in degenerative lumbar spine disease*. J Neuroeng Rehabil, 2024. **21**(1): p. 74.
51. Shafran-Tikva, S., et al., *Evaluation of Virtual Reality in the Reduction of Pain During Dressing Changes in Patients with Burn Wounds: A pilot study*. J Burn Care Res, 2024.
52. Tepper, O.M., et al., *Mixed Reality with HoloLens: Where Virtual Reality Meets Augmented Reality in the Operating Room*. Plast Reconstr Surg, 2017. **140**(5): p. 1066-1070.
53. Klaudia, P., et al., *The 3D Operating Room with Unlimited Perspective Change and Remote Support, in Applications of Augmented Reality - Current State of the Art*, B. Dr. Pierre, Editor. 2023, IntechOpen: Rijeka. p. Ch. 0.
54. *Trójwymiarowa sala operacyjna* Available from: <https://youtu.be/bGPKuTrSBRQ>.
55. Massetti, M. and G.A. Chiariello, *The metaverse in medicine*. Eur Heart J Suppl, 2023. **25**(Suppl B): p. B104-b107.
56. Wang, Y., et al., *Application and challenges of a metaverse in medicine*. Front Robot AI, 2023. **10**: p. 1291199.

57. Pregowska, A., et al., *Information and Communication Technologies Combined with Mixed Reality as Supporting Tools in Medical Education*. Electronics, 2022. **11**(22): p. 3778.
58. Proniewska, K., et al., *Immersive technologies as a solution for general data protection regulation in Europe and impact on the COVID-19 pandemic*. Cardiol J, 2021. **28**(1): p. 23-33.
59. Habbal, A., M.K. Ali, and M.A. Abuzaraida, *Artificial Intelligence Trust, Risk and Security Management (AI TRiSM): Frameworks, applications, challenges and future research directions*. Expert Systems with Applications, 2024. **240**: p. 122442.
60. *Artificial intelligence: threats and opportunities*. Available from: <https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20200918STO87404/artificial-intelligence-threats-and-opportunities>.
61. Grinbaum, A. and L. Adomaitis, *Moral Equivalence in the Metaverse*. NanoEthics, 2022. **16**.
62. *Ethics in the Metaverse*. Available from: <https://www.scu.edu/ethics/metaverse/>.
63. Chen, M., *The philosophy of the metaverse*. Ethics and Information Technology, 2023. **25**(3): p. 1-13.
64. Braun, M. and J. Krutzinna, *Digital twins and the ethics of health decision-making concerning children*. Patterns, 2022. **3**(4): p. 100469.
65. Albahri, A.S., et al., *A systematic review of trustworthy and explainable artificial intelligence in healthcare: Assessment of quality, bias risk, and data fusion*. Information Fusion, 2023. **96**: p. 156-191.
66. Rudnicka, Z., et al., *Cardiac Healthcare Digital Twins Supported by Artificial Intelligence-Based Algorithms and Extended Reality—A Systematic Review*. Electronics, 2024. **13**(5): p. 866.



„HoloMed” to nie tylko wgląd w nowoczesne technologie, ale także praktyczny przewodnik o tym, jak zintegrować te narzędzia w codziennej praktyce medycznej. Książka jest cennym źródłem wiedzy dla studentów medycyny, profesjonalistów medycznych i wszystkich zainteresowanych przyszłością medycyny cyfrowej. Poznaj potencjał technologii immersyjnych i zobacz, jak mogą one zmienić edukację medyczną oraz poprawić jakość wizualizacji danych medycznych.

Klaudia Proniewska specjalizuje się w nowoczesnych i cyfrowych metodach nauczania w edukacji medycznej. Kieruje międzynarodowym zespołem w Centrum Medycyny Cyfrowej i Robotyki przy Uniwersytecie Jagiellońskim Collegium Medicum, gdzie dzieli się swoimi doświadczeniami z integracji tych technologii w edukacji i klinicznym zastosowaniu. Jej praca koncentruje się na wizualizacji trójwymiarowych struktur anatomicznych, rzeczywistości mieszanej oraz nauczaniu problemowym w celu udoskonalenia metod nauczania w edukacji medycznej. Ma bogate doświadczenie naukowe i odbyła staże w renomowanych instytucjach na całym świecie. Więcej informacji możesz znaleźć na stronie: <https://klaudiaproniewska.com/>