

Anna Sibilska-Mroziejcz

Wydział Mechatroniki Instytut Mikromechaniki i Fotoniki Politechniki Warszawskiej
ORCID: 0000-0002-5989-9562

Katarzyna Matys-Popielska

Instytut Metrologii i Inżynierii Biomedycznej Politechniki Warszawskiej
Mechanical Engineering Department, Polytechnique Montreal, Montreal, QC, Canada
ORCID: 0000-0001-8874-2313

Krzysztof Popielski

Instytut Metrologii i Inżynierii Biomedycznej Politechniki Warszawskiej
Mechanical Engineering Department, Polytechnique Montreal, Montreal, QC, Canada
ORCID: 0000-0001-5892-8862

Wirtualna rzeczywistość w rehabilitacji – system aplikacji wspierających rehabilitację pacjentów po udarze mózgu

Streszczenie

Udar mózgu jest najczęstszą przyczyną niepełnosprawności i śmiertelności na świecie. Powikłania takie jak niedowład kończyn czy zespół zaniedbywania jednostronnego znacząco wpływają na jakość życia i samodzielność osób po udarze. Nadzieją na powrót do zdrowia jest rehabilitacja. Tradycyjna rehabilitacja wymaga jednak stałego kontaktu z fizjoterapeutą, przez co często jest ona ograniczona ze względu na dostępność i koszt. Ponadto tradycyjne ćwiczenia rehabilitacyjne często są monotonne i powodują ograniczenie motywacji pacjentów do wykonywania ćwiczeń. Obiecującym narzędziem, które może zostać zaadaptowane do potrzeb pacjentów, jest wirtualna rzeczywistość. Umożliwia ona wykreowanie immersyjnych i angażujących środowisk. Ponadto pozwala na zaprogramowanie ćwiczeń tak, aby odwzorować ruchy wykonywane podczas tradycyjnej rehabilitacji. Dzięki temu aplikacja wirtualnej rzeczywistości może częściowo zastąpić fizjoterapeutę. W niniejszym artykule przedstawiamy system złożony z trzech aplikacji VR, które naśladują ćwiczenia wykonywane przez pacjentów z syndromem zaniedbywania jednostronnego i niedowładem dłoni podczas tradycyjnej rehabilitacji. Aplikacje zostały opracowane w środowisku Unity z wykorzystaniem XR Interaction Toolkit oraz biblioteki XR Hands. Prezentujemy także wstępne wyniki testów aplikacji z udziałem wąskiej grupy pacjentów. Pokazujemy, że zastosowanie tych aplikacji może być nowym narzędziem wykorzystywanym w rehabilitacji po udarze, które zwiększa motywację pacjentów do ćwiczeń. Wynikiem tego może być polepszenie jakości życia pacjentów po udarze. Niniejszy artykuł przyczynia się do rozwoju wiedzy i praktyki w dziedzinie rehabilitacji ręki z wykorzystaniem technologii VR.

Słowa kluczowe

rehabilitacja, udar mózgu, niedowład, zespół zaniedbywania jednostronnego, wirtualna rzeczywistość, śledzenie ruchów ręki, gry dla zdrowia

Virtual Reality in Rehabilitation – a System of Applications Supporting the Rehabilitation of Stroke Patients

Abstract

Stroke is a leading cause of disability and mortality worldwide. Complications such as limb paresis and unilateral neglect syndrome significantly affect the quality of life and independence of people after stroke. The hope for recovery is rehabilitation. However, conventional rehabilitation requires constant contact with a physiotherapist, which is often limited by availability and cost. In addition, conventional rehabilitation exercises are often monotonous leading to limited patient motivation. A promising tool that can be adapted to patients' needs is virtual reality. It makes it possible to create immersive and engaging environments. In addition, it allows exercises to be programmed to replicate movements performed during conventional rehabilitation. In this way, the virtual reality application can partially replace the physiotherapist. In this article, we present a system consisting of three VR applications that mimic exercises performed by patients with unilateral neglect syndrome and hand paresis during traditional rehabilitation. The applications were developed in the Unity environment using the XR Interaction Toolkit and the XR Hands library. We also present preliminary results of testing the applications with a small group of patients. We show that these applications can serve as a new tool in post-stroke rehabilitation, increasing patients' motivation to exercise. The result could be an improvement in quality of life for post-stroke patients. This article contributes to the knowledge and practice of hand rehabilitation using VR technology.

Keywords

rehabilitation, stroke, hemiparesis, unilateral neglect syndrome, virtual reality, hand tracking, games for health

1. Wstęp

Zgodnie z definicją opublikowaną przez Światową Organizację Zdrowia (WHO), udar mózgu jest nagłym stanem zagrażającym życiu, który objawia się ogniskowymi lub uogólnionymi zaburzeniami czynności mózgu, utrzymującymi się dłużej niż 24 godziny i wymagającymi bezwzględnej hospitalizacji. Ogniskowymi objawami nazywane są zaburzenia funkcji neurologicznych, które skorelowane są z określonymi obszarami mózgu¹. Objawy te można podzielić na 5 typów:

1. Objawy ruchowe, takie jak osłabienie lub niesprawność kończyn, które mogą dotyczyć pojedynczej kończyny, dwóch kończyn po tej samej stronie ciała, trzech kończyn lub wszystkich kończyn.
2. Objawy czuciowe, takie jak zaburzenia lub utrata czucia w obrębie kończyny lub kończyn, zaburzenie widzenia, zaburzenie pola widzenia, podwójne widzenie.
3. Zaburzenia mowy, czyli objawy językowe (afazja), tj. trudności w rozumieniu mowy, doborze słów i ich artykulacji czy trudności w czytaniu, pisaniu lub liczeniu.
4. Zaburzenia zachowania, czyli objawy poznawcze, wśród nich zaburzenia pamięci, dezorientacja czasowo-przestrzenna czy trudności w wykonywaniu codziennych czynności.
5. Zaburzenia równowagi, czyli trudności w przyjęciu i utrzymaniu postawy pionowej.

Objawy te pojawiają się w różnej konfiguracji. Ich ocena przez osobę niezwiązaną z medycyną choć trudna, może być wykonana z pomocą wskazówek opublikowanych przez AHA/ASA – Amerykańskie Towarzystwo Kardiologiczne (AHA, *American Heart Association*) i Amerykańskie Towarzystwo Udarowe (ASA, *American Stroke Association*). Pierwsze symptomy udaru zostały ujęte w system o akronimie FAST (*Face Arm Speech Test*)²:

- *face drooping* – asymetria twarzy,
- *arm weakness* – osłabienie kończyny górnej,
- *speech difficulty* – zaburzenia mowy,
- *time to call* – telefon ratunkowy.

System ten jest powszechny i promowany również w Polsce, gdyż udar jest schorzeniem, w którym znajomość pierwszych objawów udaru i wczesne zareagowanie są szczególnie ważne. Czas od wystąpienia pierwszych objawów jest to czas, w którym utrzymuje się ostra niewydolność krążenia mózgowego, która może wywołać nieodwracalne skutki.

Udar mózgu można podzielić ze względu na przyczynę niewydolności. W przypadku zmniejszonego przepływu krwi powstałego w wyniku niedokrwienia mówimy o udarze niedokrwiennym, który

¹ Bilikiewicz, A.; Matkowska-Białko, D. Cognitive Impairment and Depression. *Udar Mózgu* 2004, 1, 27–37.

² Meschia, J.F.; Bushnell, C.; Boden-Albala, B.; Braun, L.T.; Bravata, D.M.; Chaturvedi, S.; Creager, M.A.; Eckel, R.H.; Elkind, M.S.V.; Fornage, M.; et al. Guidelines for the Primary Prevention of Stroke. *Stroke* 2014, 45, 3754–3832, doi:10.1161/STR.000000000000046.

stanowi około 80–88% wszystkich udarów, a w przypadku krwotoku mówimy o udarze krwotocznym stanowiącym około 12–20% wszystkich udarów^{3,4}.

Zgodnie z danymi NFZ z lat 2017–2022 co roku na udar niedokrwienny w Polsce zapada średnio 74 tys. osób⁵. Na świecie szacuje się, że udar mózgu dotyka około 17 mln osób rocznie. Pomimo panującego przekonania, że udar jest chorobą osób starszych, obserwuje się wzrost liczby zachorowań u osób młodych i w średnim wieku⁶, które są wynikiem odpowiednio stosowania różnych używek, w tym dopalaczy i wysokiego, długotrwanie utrzymującego się stresu. Obecnie około 31% incydentów udarowych występuje u osób poniżej 65 roku życia⁷.

W wyniku niedotlenienia mózgu u pacjentów po udarze obserwuje się szereg powikłań. Wśród nich można wymienić powikłania ze strony układu krwionośnego, oddechowego, pokarmowego, mięśniowo-szkieletowego czy neurologicznego, a także inne powikłania takie jak: ciągłe zmęczenie i depresja. Różnorodność i dotkliwość występujących powikłań powodują, że istotną stroną tego schorzenia jest także aspekt społeczny. Udar mózgu niezmiennie pozostaje pierwszą z głównych przyczyn chorobowości i długotrwałej niesprawności oraz drugim pod względem częstości powodem zgonów⁸. Udar mózgu jest również drugą pod względem częstości przyczyną otępienia oraz najczęstszą przyczyną padaczki u osób w podeszłym wieku i istotną przyczyną depresji^{9,10}. Powikłaniem, które dotyczy około 25–30% pacjentów, jest zespół zaniedbywania jednostronnego¹¹.

³ Mazur, R.; Świerkocka-Miastkowska, M. Udar mózgu – pierwsze objawy. *Chor. Serca i Naczyń* 2005, 84–87.

⁴ Adams, H.P.; Adams, R.J.; Brodt, T.; del Zoppo, G.J.; Furlan, A.; Goldstein, L.B.; Grubb, R.L.; Higashida, R.; Kidwell, C.; Kwiatkowski, T.G.; et al. Guidelines for the Early Management of Patients With Ischemic Stroke. *Stroke* 2003, 34, 1056–1083, doi:10.1161/01.STR.0000064841.47697.22.

⁵ Kruk, M.; Pawlewicz, A. *NFZ o Zdrowiu. Udar Niedokrwienny Mózgu; 2023*;

⁶ OMS The Global Burden of Disease 2004. *Updat. World Heal. Organ.* 2004, 146.

⁷ Vos, T.; Barber, R.M.; Bell, B.; Bertozzi-Villa, A.; Biryukov, S.; Bolliger, I.; Charlson, F.; Davis, A.; Degenhardt, L.; Dicker, D.; et al. Global, Regional, and National Incidence, Prevalence, and Years Lived with Disability for 301 Acute and Chronic Diseases and Injuries in 188 Countries, 1990–2013: A Systematic Analysis for the Global Burden of Disease Study 2013 *Lancet* 2015, 386, 743–800, doi:10.1016/S0140-6736(15)60692-4

⁸ Lopez, A.D.; Mathers, C.D.; Ezzati, M.; Jamison, D.T.; Murray, C.J. Global and Regional Burden of Disease and Risk Factors, 2001: Systematic Analysis of Population Health Data. *Lancet* 2006, 367, 1747–1757, doi:10.1016/S0140-6736(06)68770-9.

⁹ Rothwell, P.; Coull, A.; Silver, L.; Fairhead, J.; Giles, M.; Lovelock, C.; Redgrave, J.; Bull, L.; Welch, S.; Cuthbertson, F.; et al. Population-Based Study of Event-Rate, Incidence, Case Fatality, and Mortality for All Acute Vascular Events in All Arterial Territories (Oxford Vascular Study). *Lancet* 2005, 366, 1773–1783, doi:10.1016/S0140-6736(05)67702-1.

¹⁰ Graff-Radford, J. Vascular Cognitive Impairment. *Contin. Lifelong Learn. Neurol.* 2019, 25, 147–164, doi:10.1212/CON.0000000000000684.

¹¹ Gammeri, R.; Iacono, C.; Ricci, R.; Salatino, A. Unilateral Spatial Neglect After Stroke: Current Insights. *Neuropsychiatr. Dis. Treat.* 2020, Volume 16, 131–152, doi:10.2147/NDT.S171461.

1.1. Syndrom zaniku jednostronnego

Syndrom zaniku jednostronnego, zwany również zespołem pomijania stronnego, agnozą wzrokowo-przestrzenną lub nieuwagi połowicznej jest zaburzeniem w zakresie uwagi przestrzennej, polegające na ograniczeniu postrzegania i reagowania na bodźce pochodzące z części ciała przeciwnej do lokalizacji ogniska udarowego. Pacjent z zanikiem prawej strony przestrzeni nie jest świadomy tego, co dzieje się po jego lewej stronie. Nie odbiera on bodźców wzrokowych, słuchowych czy czuciowych pochodzących ze strony pomijanej, a więc nie dostrzega nikogo i niczego po tej stronie, a także nie uświadamia sobie istnienia lewej strony swojego ciała. Ponadto zazwyczaj pacjent nie ma kontroli nad kończyną górną i dolną po pomijanej stronie ciała, co skutkuje brakiem możliwości wykonywania czynności dnia codziennego, takich jak poruszanie się, ubieranie się, czesanie, jedzenie czy zmywanie naczyń.

Zespół pomijania stronnego jest rozpoznawany u około 20% chorych z uszkodzeniami lewopółkulowymi i około 43% pacjentów po udarze prawej półkuli mózgu. Po 3 miesiącach od udaru agnozja wzrokowo-przestrzenna utrzymuje się u 17% pacjentów po uszkodzeniach prawej półkuli i 5% w przypadku uszkodzeń lewej półkuli¹². Konsekwencją wystąpienia tego zespołu jest wydłużenie czasu hospitalizacji i zwiększenie kosztów opieki¹³. Spowodowane jest to koniecznością przeprowadzenia kompleksowej rehabilitacji.

1.2. Niedowład kończyny górnej

Niedowład kończyny górnej po udarze jest jednym z najpowszechniejszych powikłań^{14,15}. Niedowład może obejmować: osłabienie lub paraliż kończyny, ograniczoną kontrolę motoryczną czy deficyty sensoryczne, które występują z różną intensywnością u poszczególnych pacjentów. Paraliż może obejmować całą kończynę lub jedynie określony odcinek, np. dłoń.

Niedowład kończyny wiąże się z dużym wpływem na możliwość funkcjonowania pacjenta, gdyż zmniejsza jego zdolność do wykonywania codziennych obowiązków, a więc zmniejsza niezależność pacjenta, a także możliwość powrotu do pracy czy innych aktywności. Powikłanie to może powodować

¹² Polanowska, K.; Seniów, J. Motoryczny wariant zespołu zaniedbywania jednostronnego w następstwie uszkodzenia mózgu. *Neurol. Neurochir. Pol.* 2005, 39, 141–149.

¹³ Łojek, E.; Bolewska, A. *Wybrane zagadnienia rehabilitacji neuropsychologicznej*; Wydawnictwo Naukowe Scholar: Warszawa, 2008;

¹⁴ Conforto, A.B.; Machado, A.G.; Menezes, I.; Ribeiro, N.H. V.; Luccas, R.; Pires, D.S.; Leite, C. da C.; Plow, E.B.; Cohen, L.G. Treatment of Upper Limb Paresis With Repetitive Peripheral Nerve Sensory Stimulation and Motor Training: Study Protocol for a Randomized Controlled Trial. *Front. Neurol.* 2020, 11, doi:10.3389/fneur.2020.00196.

¹⁵ Raghavan, P. Upper Limb Motor Impairment After Stroke. *Phys. Med. Rehabil. Clin. N. Am.* 2015, 26, 599–610, doi:10.1016/j.pmr.2015.06.008.

długotrwałe trudności, gdyż szacuje się, że 30–50% osób, które przeżyły udar, po 6 miesiącach po wystąpieniu udaru nadal ma poważne upośledzenie kończyny górnej¹⁶.

1.3. Leczenie w udarze mózgu

Każdy chory z podejrzeniem udaru mózgu (UM) w fazie ostrej powinien niezwłocznie trafić do szpitala z oddziałem udarowym (OU), w celu szybkiego wdrożenia procesu diagnostycznego i postępowania terapeutycznego. Podstawowym badaniem w diagnostyce ostrych objawów ogniskowego uszkodzenia ośrodkowego układu nerwowego (OUN) jest tomografia komputerowa (TK) mózgu bez kontrastu. Pozwala rozpoznać UM, zróznicować jego etiologię (niedokrwienny albo krwotoczny) i zazwyczaj wystarcza do podjęcia decyzji terapeutycznej.

„Złoty standard” leczenia swoistego ostrego udaru niedokrwiennego mózgu niezmiennie stanowi farmakologiczne, dożylnie leczenie trombolityczne z podaniem alteplazy (rekombinowanego tkankowego aktywatora plazminogenu [rt-PA, *recombinant tissue plasminogen activator*])¹⁷. Jeżeli deficyt neurologiczny utrzymuje się powyżej 30 minut, zaleca się rutynowe stosowanie tego leczenia w ciągu pierwszych 4,5 godz. od wystąpienia objawów, tak szybko, jak to możliwe (za czas zachorowania przyjmuje się moment wystąpienia objawów, jeżeli nie jest on znany, za czas zachorowania należy przyjąć moment, kiedy pacjent po raz ostatni z całą pewnością był wolny od objawów)¹⁸.

1.4. Rehabilitacja w udarze mózgu

Każdy pacjent po UM powinien mieć dostęp do: wczesnej rehabilitacji na OU, kontynuacji wczesnej rehabilitacji na oddziałach rehabilitacji neurologicznej oraz rehabilitacji długoterminowej ambulatoryjnie lub w domu. Rehabilitacja środowiskowa, zarówno ambulatoryjna, jak i domowa, pozwala w pierwszym roku po udarze na zdobywanie przez chorych nowych umiejętności z zakresu samoobsługi i skutecznie ogranicza utratę tych umiejętności z czasem¹⁹.

¹⁶ Angerhöfer, C.; Colucci, A.; Vermehren, M.; Hömberg, V.; Soekadar, S.R. Post-Stroke Rehabilitation of Severe Upper Limb Paresis in Germany – Toward Long-Term Treatment With Brain-Computer Interfaces. *Front. Neurol.* 2021, 12, 599–610, doi:10.3389/fneur.2021.772199.

¹⁷ Powers, W.J.; Rabinstein, A.A.; Ackerson, T.; Adeoye, O.M.; Bambakidis, N.C.; Becker, K.; Biller, J.; Brown, M.; Demaerschalk, B.M.; Hoh, B.; et al. 2018 Guidelines for the Early Management of Patients With Acute Ischemic Stroke: A Guideline for Healthcare Professionals From the American Heart Association/American Stroke Association. *Stroke* 2018, 49, doi:10.1161/STR.000000000000158.

¹⁸ Kleindorfer, D.O.; Towfighi, A.; Chaturvedi, S.; Cockroft, K.M.; Gutierrez, J.; Lombardi-Hill, D.; Kamel, H.; Kernan, W.N.; Kittner, S.J.; Leira, E.C.; et al. 2021 Guideline for the Prevention of Stroke in Patients With Stroke and Transient Ischemic Attack: A Guideline From the American Heart Association/American Stroke Association. *Stroke* 2021, 52, doi:10.1161/STR.0000000000000375.

¹⁹ Legg, L.; Langhorne, P. Rehabilitation Therapy Services for Stroke Patients Living at Home: Systematic Review of Randomised Trials. *Lancet* 2004, 363, 352–356, doi:10.1016/S0140-6736(04)15434-2.

Zakres rehabilitacji jest dostosowywany do potrzeb pacjenta. Trening przeprowadzany jest w zakresie funkcji, która uległa uszkodzeniu. Opiera się ona na zasadach efektywnego uczenia się, wykorzystując plastyczność mózgu. Celem fizjoterapii u pacjenta z deficytem ruchowym, zarówno tym wynikającym z uszkodzenia pierwszorzędowej kory ruchowej, jak i bardziej złożonym, jest odtworzenie zdolności ruchowych lub ich kompensacja. Deficyt ruchowy może być niwelowany bezpośrednio przez leczenie ruchem przy czynnym udziale pacjenta.

1.4.1. Rehabilitacja w przypadku zespołu pomijania jednostronnego

W przypadku wystąpienia zespołu pomijania podczas ćwiczeń należy angażować różne bodźce teleceptywne: słuchowe i wzrokowe, które powinny kierować uwagę pacjenta na zaniechaną stronę. Ważne jest, aby zarówno ćwiczenia kończyn po stronie pomijanej, jak i trening przeszukiwania wzrokowo-przestrzennego, były dostosowane do zmienionej lub, jeżeli to możliwe, skorygowanej linii środkowej pacjenta. Ćwiczenia więc opierają się głównie na przeszukiwaniu wzrokowym zarówno po stronie niepominiętej, celem znalezienia przedmiotu do chwycenia, jak i po stronie pomijanej, celem umiejscowienia przedmiotu w docelowej przestrzeni. Sam ruch oczu lub kończyny powinien być wykonywany stopniowo od strony niepomijanej w kierunku pomijanej (do wyraźnie widocznej dla pacjenta linii lub ustalonego punktu/przedmiotu)²⁰. Rehabilitacja ma również na celu ćwiczenie chwytania przedmiotów i manipulowania nimi, zarówno w obrębie strony pomijanej, jak i niepomijanej. W wielu placówkach medycznych ćwiczenia te realizowane są poprzez szukanie na stoliku i chwytanie np. korków od butelek, późniejsze przenoszenie ich do koszyka trzymanego przez rehabilitantów po przeciwnej, nieaktywnej stronie ciała. Ćwiczenie to jest jednak monotonne i nieabsorbujące, co sprawia, że pacjent nie ma chęci go powtarzać.

1.4.2. Rehabilitacja w przypadku niedowładów dłoni

Prace^{21,22} eksplorują szereg technik leczenia kończyn górnych uszkodzonych w wyniku udaru.

Badania te podkreślają zarówno specyficzne metody rehabilitacji ręki, jak i bardziej ogólne podejścia. Według przytoczonych badań istnieje wiele metod i narzędzi dostępnych do rehabilitacji ręki, takich jak trening bilateralny, użycie piłek terapeutycznych i mas plastycznych, rękawic wyposażonych w czujniki i silniki. Pięć najbardziej skutecznych, opartych na dowodach naukowych terapii zidentyfikowanych

²⁰ P. Conti, R.; Arnone, J.M. Unilateral Neglect: Assessment and Rehabilitation. *Int. J. Neurosci. Behav. Sci.* 2016, 4, 1–10, doi:10.13189/ijnbs.2016.040101.

²¹ Oujamaa, L.; Relave, I.; Froger, J.; Mottet, D.; Pelissier, J.-Y. Rehabilitation of Arm Function after Stroke. Literature Review. *Ann. Phys. Rehabil. Med.* 2009, 52, 269–293, doi:10.1016/j.rehab.2008.10.003.

²² Pomeroy, V.; Aglioti, S.M.; Mark, V.W.; McFarland, D.; Stinear, C.; Wolf, S.L.; Corbetta, M.; Fitzpatrick, S.M. Neurological Principles and Rehabilitation of Action Disorders. *Neurorehabil. Neural Repair* 2011, 25, 335–435, doi:10.1177/1545968311410942.

w celu poprawy funkcji ręki po udarze to: terapia wymuszonego użycia (CIMT), praktyka wyobrażeń mentalnych, terapia lustrzana, wirtualna rzeczywistość oraz intensywne powtarzanie ćwiczeń ukierunkowanych na zadania²³.

Terapia obserwacji czynności (AOT) jest podejściem terapeutycznym, które polega na tym, że pacjent obserwuje, naśladuje i wykonuje działania demonstrowane przez zdrową osobę. Proces ten zazwyczaj wykorzystuje nagrania wideo zarejestrowane z perspektywy pierwszoosobowej lub trzecioosobowej²⁴. Po obejrzeniu tych nagrań pacjent stara się odtworzyć obserwowane czynności, a terapeuta zapewnia informacje zwrotne i pomoc w razie potrzeby. Działania wybierane do AOT często obejmują codzienne zadania, takie jak podnoszenie szklanki wody, pisanie czy czesanie włosów. Badania wykazały, że AOT jest szczególnie skuteczna u pacjentów po udarze, zwłaszcza w podostrej i przewlekłej fazie rekonwalescencji²⁵.

Z kolei terapia lustrzana oferuje prostą i ekonomiczną metodę promowania plastyczności mózgu i ponownego uczenia się umiejętności motorycznych. Technika ta polega na tym, że pacjent wykonuje określone ruchy lub zadania niesparaliżowaną kończyną, podczas gdy jest ona odbijana w lustrze umieszczonym na linii środkowej ciała. Taki układ pozwala pacjentowi zobaczyć odbicie niesparaliżowanej kończyny tak, jakby była to kończyna dotknięta paraliżem, dostarczając wizualnej informacji zwrotnej, która stymuluje specyficzne obwody neuronalne zaangażowane w ruch.

Metoda ta została uznana za skuteczną w stymulowaniu obszarów mózgu odpowiedzialnych za kontrolę motoryczną i regenerację.

1.4.3. Wykorzystanie wirtualnej rzeczywistości w rehabilitacji po udarze mózgu

Terapia z użyciem wirtualnej rzeczywistości polega na wykorzystaniu technologii łączącej obserwację i wykonywanie powtarzanych czynności. Wytyczne wskazują, że z tą formą rehabilitacji wiąże się duże nadzieje²⁶. Choć obecnie nie jest to szeroko stosowana forma terapii, prowadzone są liczne badania w kierunku wykorzystania wirtualnej rzeczywistości w rehabilitacji, które w dalszej perspektywie pozwolą na przetestowanie i w konsekwencji wprowadzenie tej technologii do użytku. Wiele badań

²³ Morse, H.; Biggart, L.; Pomeroy, V.; Rossit, S. Exploring Perspectives from Stroke Survivors, Carers and Clinicians on Virtual Reality as a Precursor to Using Telerehabilitation for Spatial Neglect Post-Stroke. *Neuropsychol. Rehabil.* 2022, 32, 767–791, doi:10.1080/09602011.2020.1819827.

²⁴ Yu, J.; Park, J. The Effect of First-person Perspective Action Observation Training on Upper Extremity Function and Activity of Daily Living of Chronic Stroke Patients. *Brain Behav.* 2022, doi:10.1002/brb3.2565.

²⁵ Borges, L.R.; Fernandes, A.B.; Melo, L.P.; Guerra, R.O.; Campos, T.F. Action Observation for Upper Limb Rehabilitation after Stroke. *Cochrane Database Syst. Rev.* 2018, 2018, doi:10.1002/14651858.CD011887.

²⁶ Błażejewska-Hyżorek, B.; Czernuszenko, A.; Członkowska, A.; Ferens, A.; Gąsecki, D.; Kaczorowski, R.; Karaszewski, B.; Karliński, M.; Kaźmierski, R.; Kłysz, B.; et al. Wytyczne postępowania w udarze mózgu. *Pol. Przegląd Neurol.* 2019, 15, 1–156, doi:10.5603/PPN.2019.0001.

koncentruje się na sprawdzeniu skuteczności aplikacji VR w stosunku do tradycyjnej rehabilitacji^{27,28}. Wskazywane w nich są takie aspekty jak większy wpływ immersyjnej VR na poprawę równowagi i zmniejszenie ryzyka upadków^{29,30}, a także na percepcję wizualnej pionowości u pacjentów po udarze mózgu, co może sugerować, że immersyjna VR może być odpowiednim narzędziem do leczenia zaburzeń równowagi w przewlekłym udarze niedokrwiennym mózgu³¹. Inne badania mówią o poprawie funkcji motorycznych i sprawności manualnej pacjentów po udarze niedokrwiennym ćwiczących z immersyjnymi systemami VR³².

Badania hiszpańskich naukowców pokazują, że konwencjonalne podejście rehabilitacyjne w połączeniu z wirtualną rzeczywistością wydaje się być bardziej skuteczne niż samo leczenie konwencjonalne w zakresie poprawy ocenianej i postrzeganej jakości życia związanej ze zdrowiem u osób, które przeżyły udar mózgu, a także te same badania wskazują, że na trzy miesiące po zakończeniu leczenia efekt połączonej terapii zmniejsza dolegliwości, szczególnie w wymiarze bólu, lęku i depresji³³. Jest to zgodne z innymi badaniami, które oprócz poprawy parametrów fizycznych, wykazują także większe zadowolenie z fizjoterapii wśród pacjentów i bardziej chętnie wykonywanie ćwiczeń, co przekłada się także na poprawę zdrowia psychicznego^{34,35}.

²⁷ Tynterova, A.; Shusharina, N.; Barantsevich, E.; Khoymov, M.; Rozhdestvensky, A. Virtual Reality Technology in Personalized Rehabilitation of Patients with Acute Ischemic Stroke. *Eur. Phys. J. Spec. Top.* 2024, 233, 723–731, doi:10.1140/epjs/s11734-023-01079-x.

²⁸ Bouatrous, A.; Meziane, A.; Zenati, N.; Hamitouche, C. An Interactive Virtual Reality System Based on Leap Motion Controller for Hand Motor Rehabilitation. In Proceedings of the 2024 8th International Conference on Image and Signal Processing and their Applications (ISPA); IEEE, April 21 2024; pp. 1–5.

²⁹ Fan, T.; Wang, X.; Song, X.; Zhao, G.; Zhang, Z. Research Status and Emerging Trends in Virtual Reality Rehabilitation: Bibliometric and Knowledge Graph Study. *JMIR Serious Games* 2023, 11, e41091, doi:10.2196/41091.

³⁰ Aderinto, N.; Olatunji, G.; Abdulbasit, M.O.; Edun, M.; Aboderin, G.; Egbunu, E. Exploring the Efficacy of Virtual Reality-Based Rehabilitation in Stroke: A Narrative Review of Current Evidence. *Ann. Med.* 2023, 55, doi:10.1080/07853890.2023.2285907.

³¹ Cortés-Pérez, I.; Nieto-Escamez, F.A.; Obrero-Gaitán, E. Immersive Virtual Reality in Stroke Patients as a New Approach for Reducing Postural Disabilities and Falls Risk: A Case Series. *Brain Sci.* 2020, 10, 296, doi:10.3390/brainsci10050296.

³² Fang, Z.; Wu, T.; Lv, M.; Chen, M.; Zeng, Z.; Qian, J.; Chen, W.; Jiang, S.; Zhang, J. Effect of Traditional Plus Virtual Reality Rehabilitation on Prognosis of Stroke Survivors. *Am. J. Phys. Med. Rehabil.* 2022, 101, 217–228, doi:10.1097/PHM.0000000000001775.

³³ Rodríguez-Hernández, M.; Criado-Álvarez, J.-J.; Corregidor-Sánchez, A.-I.; Martín-Conty, J.L.; Mohedano-Moriano, A.; Polonio-López, B. Effects of Virtual Reality-Based Therapy on Quality of Life of Patients with Subacute Stroke: A Three-Month Follow-Up Randomized Controlled Trial. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2021, 18, 2810, doi:10.3390/ijerph18062810.

³⁴ Sveistrup, H. Motor Rehabilitation Using Virtual Reality. *J. Neuroeng. Rehabil.* 2004, 1, 10, doi:10.1186/1743-0003-1-10.

³⁵ Rose, T.; Nam, C.S.; Chen, K.B. Immersion of Virtual Reality for Rehabilitation – Review. *Appl. Ergon.* 2018, 69, 153–161, doi:10.1016/j.apergo.2018.01.009.

Jeśli chodzi o aspekt technologiczny, wiele badań opisywanych w literaturze^{36-37,38} dotyczy wykorzystania w rehabilitacji nieimmersyjnej technologii VR, która jest łatwiej dostępna. Może ona jednak zmniejszać poczucie realizmu, przez co obniżyć zaangażowanie do wykonywania ćwiczeń. Z tego powodu zalecane jest wykorzystanie technologii immersyjnej, której dostępność w wyniku rozwoju technologii stale wzrasta.

2. System aplikacji wspierających rehabilitację

W ramach systemu powstały trzy aplikacje wspierające rehabilitację pacjentów po udarze. Ze względu na wspólną grupę docelową, aplikacje te mają zbieżne założenia główne, takie jak:

- minimalizacja ryzyka urazu w trakcie ćwiczeń, która została zrealizowana poprzez możliwość obsługi w pozycji siedzącej,
- minimalizacja liczby przycisków, które są konieczne do obsługi aplikacji,
- uproszczenie fabuły gry, tak aby była ona łatwa i intuicyjna,
- uproszczenie środowiska aplikacji, tak aby było przyjemne, ale nie rozpraszało.

Każda z aplikacji została zrealizowana przy użyciu silnika Unity z wykorzystaniem immersyjnej wirtualnej rzeczywistości z możliwością obsługi na headsecie VR Oculus Quest 2. Każda z aplikacji przeznaczona jest dla innej grupy pacjentów:

- Aplikacja nr 1 („jabłka”) – przeznaczona jest dla pacjentów z zespołem pomijania oraz niedowładami kończyny górnej, zaczynających ćwiczenia z wykorzystaniem aplikacji wirtualnej rzeczywistości,
- Aplikacja nr 2 („kolory”) – przeznaczona jest dla pacjentów z zespołem pomijania oraz niedowładami kończyny górnej, którzy z powodzeniem wykorzystują aplikację nr 1 w ćwiczeniach rehabilitacyjnych,
- Aplikacja nr 3 („szachy”) – przeznaczona jest dla pacjentów z niedowładami dłoni.

Najważniejsze aspekty aplikacji zostały przedstawione, w kolejnych podrozdziałach.

2.1. Aplikacja nr 1 – „jabłka”

Aplikacja zatytułowana „jabłka” odtwarza typowe ćwiczenie wykonywane przez pacjentów, polegające na przenoszeniu elementu ze strony niepomijanej, na stronę pomijaną. Zadaniem pacjenta

³⁶ Dordevic, M.; Maile, O.; Das, A.; Kundu, S.; Haun, C.; Baier, B.; Müller, N.G. A Comparison of Immersive vs. Non-Immersive Virtual Reality Exercises for the Upper Limb: A Functional Near-Infrared Spectroscopy Pilot Study with Healthy Participants. *J. Clin. Med.* 2023, 12, 5781, doi:10.3390/jcm12185781.

³⁷ Fusco, A.; Tieri, G. Challenges and Perspectives for Clinical Applications of Immersive and Non-Immersive Virtual Reality. *J. Clin. Med.* 2022, 11, 4540, doi:10.3390/jcm11154540.

³⁸ Corbetta, D.; Imeri, F.; Gatti, R. Rehabilitation That Incorporates Virtual Reality Is More Effective than Standard Rehabilitation for Improving Walking Speed, Balance and Mobility after Stroke: A Systematic Review. *J. Physiother.* 2015, 61, 117–124, doi:10.1016/j.jphys.2015.05.017.

jest chwycenie jabłka znajdującego się po stronie niepomijanej, a więc dobrze widocznej dla pacjenta, a następnie przeniesienie go na stronę pomijaną. W zadaniu tym wspomagają pacjenta strzałki kierujące jego uwagę na stronę pomijaną, a także linia, która wskazuje położenie pola docelowego.

Po każdym poprawnym przeniesieniu jabłka na wskazane pole, jabłko ponownie pojawia się po stronie niepomijanej (w innym miejscu niż poprzednio) i zmieniane jest położenie pola, na które powinno zostać przeniesione jabłko. Zliczane są także punkty, co pozwala śledzić postęp pacjenta.

W aplikacji pacjent może wybrać jeden z trzech dostępnych poziomów, które różnią się zakresem, w którym pojawia się jabłko po stronie niepomijanej i pole po stronie pomijanej.

Wybór poziomu pozwala na dopasowanie poziomu aplikacji do zakresu ruchu pacjenta. Dzięki temu aplikacja może być wykorzystywana przez większą grupę pacjentów. Oprócz możliwości wyboru poziomu, w aplikacji dodana została możliwość resetu z myślą o sytuacjach, gdy pacjent nie jest w stanie odłożyć jabłka na właściwe miejsce lub upuścić je i nie może go podnieść. Użycie przycisku reset powoduje powrót jabłka na stronę niepomijaną stołu, co umożliwi powtórzenie próby wykonania ćwiczenia.

Szczegółowy opis wszystkich elementów zaimplementowanych w aplikacji nr 1 został zawarty w artykułach³⁹.

2.2. Aplikacja nr 2 – „kolory”

Aplikacja zatytułowana „kolory” podobnie odtwarza typowe ćwiczenie wykonywane przez pacjentów, polegające na przenoszeniu elementu ze strony niepomijanej na stronę pomijaną. W tym przypadku jednak, pacjent musi przenieść przedmiot oznaczony jednym z czterech kolorów do skrzynki w odpowiadającym kolorze. W związku z tym pacjent na początku musi spojrzeć na kolor skrzynki, następnie wybrać odpowiedni przedmiot i przenieść go do skrzynki. Tym razem przedmiot, który należy przenieść, zawsze pojawia się w tym samym miejscu. Natomiast skrzynka, w której należy go umieścić, pojawia się w jednym z trzech określonych położań. Położenie to związane jest z wybranym poziomem trudności. Ponadto w aplikacji nr 2 dodany został czwarty poziom, w którym wyświetlane są dwie skrzynki w losowych kolorach w dwóch losowych miejscach, a zatem poprawne wykonanie powtórzenia wymaga przeniesienia dwóch przedmiotów.

Podobnie jak w aplikacji nr 1, po poprawnie wykonanym ruchu, przedmiot wraca na miejsce początkowe, pojawia się skrzynka w innym kolorze i zliczane są punkty. Ponownie także dodany został przycisk umożliwiający zresetowanie pozycji przycisku.

Aplikacja nr 2 przeznaczona jest dla pacjentów, którzy mają mniejszy deficyt zakresu pola widzenia, gdyż w tej aplikacji (inaczej niż w aplikacji nr 1) nie ma dodatkowych bodźców naprowadzających pacjenta na stronę pomijaną. Takie rozróżnienie aplikacji pozwala zwiększyć liczbę potencjalnych użytkowników całego systemu aplikacji do rehabilitacji po udarze mózgu.

³⁹ Matys-Popielska, K.; Popielski, K.; Sibilska-Mroziewicz, A. Study of the Possibility of Using Virtual Reality Application in Rehabilitation among Elderly Post-Stroke Patients. *Sensors* 2024, 24, 2745, doi:10.3390/s24092745.

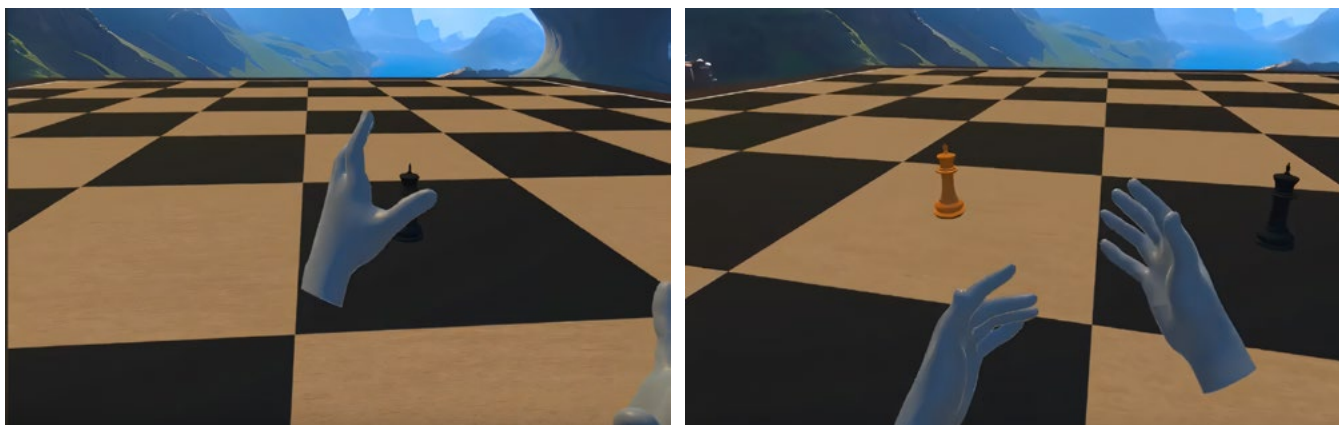
Szczegółowy opis wszystkich elementów zaimplementowanych w aplikacji nr 2 został zawarty w artykule „*Immersive Virtual Reality Application for Rehabilitation in Unilateral Spatial Neglect: A Promising New Frontier in Post-Stroke Rehabilitation*”.

2.3. Aplikacja nr 3 – „szachy”

W aplikacji „szachy” pacjent skupia się na ćwiczeniu zdolności palpacyjnych. W grze poprzez wykonywanie określonych gestów dłoni ustawiane są pionki na szachownicy. Określone gesty wzorowane są na prawdziwym procesie rehabilitacyjnym i muszą być utrzymane przez określony czas. Do ćwiczenia z wykorzystaniem aplikacji zachęcają pacjenta animacje, jak również bajkowe otoczenie i efekty dźwiękowe.

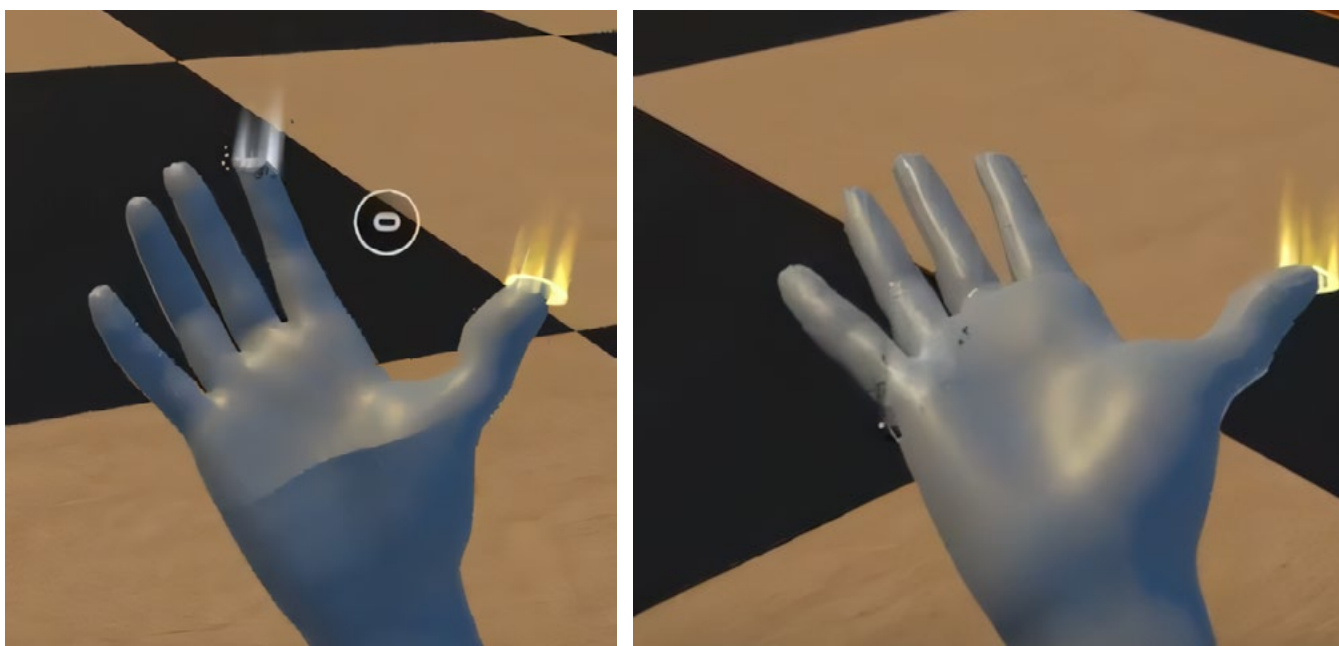
Aplikacja wykorzystuje motyw gry w szachy, aby pomóc pacjentom poprawić motorykę ręki. Została opracowana przy użyciu silnika Unity oraz bibliotek XR Interaction Toolkit i XR Hands, która umożliwia rozpoznawanie i śledzenie pozycji dłoni. Aplikacja wymaga od pacjentów utrzymania gestu dłoni przez określony czas. Gest powoduje pojawienie się na szachownicy figury szachowej wielkości użytkownika. Dodatkowo, aby zmotywować pacjentów do ćwiczenia oraz zwiększyć ich zaangażowanie pojawiają się efekty dźwiękowe i animacje.

Na początku gry pacjenci widzą dwa króle do chwycenia wirtualnymi dłońmi (rysunek 1), ustalając rękę treningową na podstawie początkowego wyboru. Ta decyzja determinuje układ planszy i rękę, która będzie trenowana, umożliwiając ukierunkowane ćwiczenia rehabilitacyjne. Na przykład chwycenie czarnego króla prawą ręką i białego króla lewą oznacza, że najpierw prawa ręka będzie układać czarne pionki, a następnie lewa ręka białe pionki, co ułatwia skoncentrowany trening każdej z rąk.



Rysunek 1. Zrzut ekranu z aplikacji VR pokazujący wybór przez użytkownika kolejności gry oraz lewej lub prawej ręki do treningu

Podczas rozgrywki gracze mają za zadanie utrzymywać dłonie w określonych gestach, takich jak dotknięcie opuszków palców lub części dłoni kciukiem, przez ustalony czas. Na przykład dotknięcie czubka palca wskazującego może spowodować pojawienie się wieży, podczas gdy dotknięcie podstawy małego palca może wywołać pojawienie się pionka. Aby pomóc pacjentom w wykonywaniu tych gestów, wirtualne markery na renderowanej w VR dłoni (rysunek 2) wskazują precyzyjny wymagany gest, wzbogacając interaktywne doświadczenie i ułatwiając ukierunkowane ćwiczenia rehabilitacyjne dłoni.



Rysunek 2. Zrzut ekranu z aplikacji VR pokazujący dłonie użytkownika z markerami

Gesty w aplikacji VR muszą być utrzymywane przez określony czas, śledzony przez wirtualny zegar (rysunek 3). Ten zegar nie tylko odlicza czas, ale także symuluje dźwięk tykania. Te wskazówki dźwiękowe są kluczowe, ponieważ informują terapeutę, że pacjent prawidłowo wykonuje ćwiczenie, zapewniając bezpośrednie połączenie między działaniami pacjenta a możliwościami monitorowania terapeuty, co wzmacnia proces terapeutyczny poprzez terminową i dokładną informację zwrotną.



Rysunek 3. Zrzut ekranu z aplikacji VR pokazujący malejący zegar odliczający czas utrzymywania gestu

Po utrzymaniu gestu przez wymagany czas, wraz z osiągnięciem zera na wirtualnym zegarze, pojawia się figura szachowa (rysunek 4), zwiększając zaangażowanie poprzez motywującą muzykę i animacje przypominające fajerwerki. Aby kontynuować, gracze muszą otworzyć dłonie, co uruchamia nowy zegar do odmierzenia czasu ustawienia kolejnej figury, płynnie integrując ćwiczenia terapeutyczne z interaktywnymi, nagradzającymi elementami, aby wzbogacić doświadczenie rehabilitacyjne.



Rysunek 4. Zrzut ekranu z aplikacji VR pokazujący dłoń użytkownika z pojawiającymi się figurami szachowymi wraz z animacjami

Aplikacja wykorzystuje zasoby z Unity Asset Store oraz korzysta z wygenerowanego przez sztuczną inteligencję tła (skybox) z blockadelabs.com, ukazując rosnący trend użycia sztucznej inteligencji do efektywnego tworzenia immersyjnych środowisk VR. Wybór powszechnie rozpoznawanej gry w szachy upraszcza proces nauki, pomagając w zaangażowaniu pacjenta w proces terapeutyczny. To innowacyjne podejście do rehabilitacji ręki, łączące znaną rozgrywkę z zaawansowanymi

technologiami VR i AI, niesie obietnicę poprawy wyników pacjentów i jakości ich życia, reprezentując znaczący krok naprzód w praktykach terapeutycznych.

3. Badania z udziałem fizjoterapeutów i pacjentów

Stworzone aplikacje zostały poddane ocenie fizjoterapeutów pracujących z pacjentami po udarze. Wśród zalet powtarzających się w stosunku do wszystkich aplikacji wymieniali oni:

- przyjemne, relaksujące środowisko,
- możliwość użytkowania aplikacji na siedząco,
- prostotę używania i tłumaczenia ćwiczeń,
- możliwość używania tylko jednej kończyny górnej,
- bardzo dobre rozróżnienie poziomów w grze, dzięki czemu gra będzie stosownym ćwiczeniem dla pacjentów z różnym poziomem zaawansowania.

Ponadto w przypadku aplikacji nr 1 występuje częste przekraczanie linii środka, a dodatkowo, w trakcie ćwiczeń z wykorzystaniem aplikacji, kończyna górna w znacznym stopniu pracuje (zaciskanie i rozluźnianie dłoni, ruch w stawie nadgarstkowym, łokciowym i barkowym), przez co gra idealnie będzie nadawała się dla pacjentów hospitalizowanych ze względu na syndrom zaniku jednostronnego, ale także będzie świetnym ćwiczeniem dla pacjentów z niedowładami zarówno poudarowymi, jak też innej etiologii.

Po pozytywnej opinii fizjoterapeutów zostały przeprowadzone badania z udziałem pacjentów Kliniki Rehabilitacji w Międzylesiu.

W trakcie badań zbierana była informacja zwrotna od pacjentów odnośnie do nowego sposobu rehabilitacji i elementów zawartych w aplikacji. Wśród głównych elementów wymienianych jako zalety aplikacji były: bajkowe środowisko, które pozwala się zrelaksować (87,5% uczestników), bardziej ekscytująca forma rehabilitacji (93,75% uczestników) oraz obecność efektów dźwiękowych sygnalizujących poprawność wykonanego ćwiczenia (56,25% uczestników). Uczestnicy zasugerowali również, że przyszłe aplikacje powinny zwracać szczególną uwagę na środowisko, aby uczynić je jeszcze bardziej różnorodnym, interesującym, bajkowym i angażującym, oraz że przyszłe aplikacje powinny angażować więcej bodźców poprzez dodanie muzyki i innych efektów dźwiękowych do gry. Ponadto rozszerzane w przyszłości aplikacje powinny umożliwiać zmianę tego środowiska przy zachowaniu założeń terapeutycznych (np. zamiast przenoszenia jabłka przenoszenie złowionej ryby do wiadra).

Aplikacja nr 1 oraz aplikacja nr 2 testowane były łącznie na grupie 65 osób (26 kobiet i 39 mężczyzn) w wieku 21–87 lat. Przeprowadzone testy z udziałem pacjentów przy wykorzystaniu aplikacji „jabłka” i „kolory” wskazują, że opracowane aplikacje mogą być wykorzystane w rehabilitacji pacjentów po udarze mózgu. Dodatkowo przeprowadzone badania pozwalają stwierdzić, że wykorzystanie wirtualnej rzeczywistości możliwe jest przez osoby w każdym wieku, również powyżej 60 roku życia. Osoby z tej grupy wiekowej mogą być jednak bardziej sceptyczne w pierwszym kontakcie z wirtualną

rzeczywistością. Istotnym aspektem, który należy wziąć pod uwagę, jest możliwość wystąpienia choroby cybersickness, co może wiązać się z koniecznością skrócenia czasu terapii lub całkowitej rezygnacji z tej formy terapii.

Dotychczasowe badania pokazały, że zdolność wykonania ćwiczenia rehabilitacyjnego z wykorzystaniem wirtualnej rzeczywistości zależy od stanu psychofizycznego pacjenta.

3.1. Testowanie aplikacji nr 3 z udziałem pacjentów

Pierwsze testy z udziałem pacjentów przeprowadzone zostały na grupie 16 osób (10 mężczyzn i 6 kobiet) przebywających w klinice rehabilitacyjnej w związku z przebytą chorobą neurologiczną (najczęściej udarem mózgu). Pacjenci w wieku 45–85 lat zostali zakwalifikowani do badania przez fizjoterapeutę.

Celem badania było sprawdzenie możliwości wykonania ćwiczenia w wirtualnej rzeczywistości. Ze względu na zróżnicowane możliwości fizyczne jedynie 43,75% pacjentów udało się ustawić zarówno białe, jak i czarne figury na planszy, 43,75% pacjentów ustawiło tylko jeden kolor figur, a 12,5% pacjentów nie wykonało żadnej serii. Pacjenci, którzy nie byli w stanie wykonać ćwiczenia, mieli mniejszy zakres ruchu paliczków niż wymagany do poprawnego wykonania ćwiczenia. Pierwszym wnioskiem z badań była więc konieczność zmodernizowania aplikacji, tak aby możliwe było zindywidualizowane ustawienie maksymalnego zakresu ruchu.

W trakcie badań mierzony był czas wykonania ćwiczenia. Wszyscy pacjenci, którzy zdołali wykonać dwie serie ćwiczeń, uzyskali lepszy czas w przypadku używania dłoni nieobjętej powikłaniami po udarze, niż w przypadku używania dłoni nie w pełni sprawnej w wyniku udaru. Nie wykazano natomiast korelacji pomiędzy wiekiem pacjentów a czasem wykonywania ćwiczenia. Te dwie obserwacje mogą wskazywać, że czas wykonywania serii ćwiczeń może być wykorzystywany w śledzeniu postępów rehabilitacji.

4. Wnioski

Opracowane aplikacje stanowią innowacyjną metodę rehabilitacji wspomagającej, która pozwala na wzbogacenie obecnie stosowanych metod terapii. Ze względu na pozytywny odbiór tej technologii oraz angażujące i wciągające środowisko pacjenci chętnie korzystają z technologii VR w rehabilitacji. Pozwala to wydłużyć całkowity czas terapii i zwiększyć motywację pacjenta do wykonywania ćwiczeń. Metoda ta może być wykorzystywana przez pacjentów w każdym wieku. Jednym z ograniczeń jest sceptycyzm osób starszych w stosunku do nowych technologii. Innym ograniczeniem jest ryzyko wystąpienia choroby cybersickness⁴⁰. Jest to schorzenie podobne do choroby lokomocyjnej, którego

⁴⁰ Ramaseri Chandra, A.N.; El Jamiy, F.; Reza, H. A Systematic Survey on Cybersickness in Virtual Environments. *Computers* 2022, 11, 51, doi:10.3390/computers11040051.

wystąpienie zależy od indywidualnych predyspozycji osoby korzystającej z headsetu VR. Objawy tej choroby mogą obejmować bóle i zawroty głowy, zmęczenie, nudności czy wymioty^{41,42}. Dlatego istotna jest obecność fizjoterapeuty przy pierwszym korzystaniu z tej technologii w rehabilitacji. Fizjoterapeuta nie tylko może zachęcić pacjenta do skorzystania z tej metody rehabilitacji, ale także może przerwać wykonywanie ćwiczeń w przypadku wystąpienia niepożądanych objawów. Ponadto kluczowe jest, aby, mając świadomość możliwości wystąpienia cybersickness, stosować zabiegi programistyczne zmniejszające to ryzyko.

Przeprowadzone testy pokazały, że aplikacje muszą być dostosowane do potrzeb i umiejętności pacjentów, aby były dobrym narzędziem w rehabilitacji. Niezbędne są więc zarówno poziomy trudności, jak i możliwość kalibracji ustawień początkowych. Bez tych elementów aplikacje nie będą dostępne dla pacjentów z większymi deficytami, przez co grupa ich potencjalnych użytkowników będzie ograniczona. Istotne jest również zachowanie jak największej motywacji pacjentów do rehabilitacji. Aplikacje powinny więc umożliwiać odizolowanie się pacjenta od środowiska szpitalnego, a więc pozwalać na głęboką imersję poprzez ciekawe i różnorodne środowisko, oraz zabiegi związane z bodźcami takimi jak dźwięk. Istotne też jest wplecenie elementów gamifikacji poprzez dodanie systemu nagród i punktów.

Obecnie system aplikacji opiera się na rehabilitacji pacjentów z syndromem zaniku jednostronnego i niedowładami kończyny górnej. Aby system ten mógł być wykorzystywany przez szerszą grupę pacjentów, oprócz modyfikacji istniejących aplikacji, niezbędne będzie dodanie kolejnych, które obejmować będą inne powikłania występujące w wyniku udaru mózgu.

5. Podsumowanie

Szybko rozwijające się nowoczesne technologie, takie jak wirtualna rzeczywistość, są narzędziem nie tylko do rozrywki, ale mogą być wykorzystane także w rehabilitacji. Aplikacje VR, dzięki bogatym wirtualnym środowiskom, natychmiastowej informacji zwrotnej, zabawnym i angażującym doświadczeniom oraz możliwości zaimplementowania wielu schematów ruchowych, pozwalają na odwzorowanie tradycyjnej rehabilitacji oraz mogą zwiększyć motywację pacjentów i zachęcić ich do intensywniejszych ćwiczeń. Ważne jest takie zaprojektowanie ćwiczeń, aby można było modyfikować ich trudność i intensywność indywidualnie dla każdego pacjenta. Dlatego tak istotna jest współpraca inżynierów, lekarzy i fizjoterapeutów, aby możliwe było opracowanie narzędzia wspomagającego pracę pacjentów.

⁴¹ Kim, H.; Kim, D.J.; Chung, W.H.; Park, K.-A.; Kim, J.D.K.; Kim, D.; Kim, K.; Jeon, H.J. Clinical Predictors of Cybersickness in Virtual Reality (VR) among Highly Stressed People. *Sci. Rep.* 2021, 11, 12139, doi:10.1038/s41598-021-91573-w.

⁴² Yildirim, C. Don't Make Me Sick: Investigating the Incidence of Cybersickness in Commercial Virtual Reality Headsets. *Virtual Real.* 2020, 24, 231–239, doi:10.1007/s10055-019-00401-0.

Podziękowania

Autorzy chcieliby podziękować wszystkim uczestnikom, którzy wzięli udział w tym badaniu. Lekarzom, rehabilitantom i terapeutom: Rafałowi Zielińskiemu, Łukaszowi Wieczorkowskiemu, Kazimierze Grzywacz, Marlenie Puchalskiej, Włodzimierzowi Cioć i Paulinie Matys za pomoc przy realizacji badań z udziałem pacjentów oraz za konsultacje.

Finansowanie

Badania zostały sfinansowane przez Państwowy Fundusz Rehabilitacji Osób Niepełnosprawnych oraz Politechnikę Warszawską na podstawie umowy o dofinansowanie nr BEA/000064/BF/D z dnia 31 grudnia 2022 r.

Zgoda na badania z udziałem ludzi

Niniejsze badanie i wszystkie procedury zostały zatwierdzone przez Zespół ds. Etyki Badań z Udziałem Ludzi Politechniki Warszawskiej (kod protokołu 1/2023 i data zatwierdzenia 22 lutego 2023 r.) dla badań z udziałem ludzi.

Oświadczenie o dostępności danych

Aplikacje opisane w niniejszej pracy dostępne są na stronie: <https://powerstudpw.itch.io>

Konflikt interesów

Autorzy deklarują brak konfliktu interesów.

Bibliografia

1. Bilikiewicz, A.; Matkowska-Białko, D. Cognitive Impairment and Depression. *Udar Mózgu* 2004, 1, 27–37.
2. Meschia, J.F.; Bushnell, C.; Boden-Albala, B.; Braun, L.T.; Bravata, D.M.; Chaturvedi, S.; Creager, M.A.; Eckel, R.H.; Elkind, M.S.V.; Fornage, M.; et al. Guidelines for the Primary Prevention of Stroke. *Stroke* 2014, 45, 3754–3832, doi:10.1161/STR.0000000000000046.
3. Mazur, R.; Świerkocka-miastkowska, M. Udar Mózgu – Pierwsze Objawy. *Chor. Serca i Naczyní* 2005, 84–87.
4. Adams, H.P.; Adams, R.J.; Brott, T.; del Zoppo, G.J.; Furlan, A.; Goldstein, L.B.; Grubb, R.L.; Higashida, R.; Kidwell, C.; Kwiatkowski, T.G.; et al. Guidelines for the Early Management of Patients With Ischemic Stroke. *Stroke* 2003, 34, 1056–1083, doi:10.1161/01.STR.0000064841.47697.22.
5. Kruk, M.; Pawlewicz, A. *NFZ o Zdrowiu. Udar Niedokrwienny Mózgu; 2023;*
6. OMS The Global Burden of Disease 2004. *Updat. World Heal. Organ.* 2004, 146.
7. Vos, T.; Barber, R.M.; Bell, B.; Bertozzi-Villa, A.; Biryukov, S.; Bolliger, I.; Charlson, F.; Davis, A.; Degenhardt, L.; Dicker, D.; et al. Global, Regional, and National Incidence, Prevalence, and Years Lived with Disability for 301 Acute and Chronic Diseases and Injuries in 188 Countries, 1990–2013: A Systematic Analysis for the Global Burden of Disease Study 2013. *Lancet* 2015, 386, 743–800, doi:10.1016/S0140-6736(15)60692-4.
8. Lopez, A.D.; Mathers, C.D.; Ezzati, M.; Jamison, D.T.; Murray, C.J. Global and Regional Burden of Disease and Risk Factors, 2001: Systematic Analysis of Population Health Data. *Lancet* 2006, 367, 1747–1757, doi:10.1016/S0140-6736(06)68770-9.
9. Rothwell, P.; Coull, A.; Silver, L.; Fairhead, J.; Giles, M.; Lovelock, C.; Redgrave, J.; Bull, L.; Welch, S.; Cuthbertson, F.; et al. Population-Based Study of Event-Rate, Incidence, Case Fatality, and Mortality for All Acute Vascular Events in All Arterial Territories (Oxford Vascular Study). *Lancet* 2005, 366, 1773–1783, doi:10.1016/S0140-6736(05)67702-1.
10. Graff-Radford, J. Vascular Cognitive Impairment. *Contin. Lifelong Learn. Neurol.* 2019, 25, 147–164, doi:10.1212/CON.0000000000000684.
11. Gammeri, R.; Iacono, C.; Ricci, R.; Salatino, A. Unilateral Spatial Neglect After Stroke: Current Insights. *Neuropsychiatr. Dis. Treat.* 2020, Volume 16, 131–152, doi:10.2147/NDT.S171461.
12. Polanowska, K.; Seniów, J. Motoryczny Wariant Zespołu Zaniechania Jednostronnego w Następstwie Uszkodzenia Mózgu. *Neurol. Neurochir. Pol.* 2005, 39, 141–149.
13. Łojek, E.; Bolewska, A. *Wybrane Zagadnienia Rehabilitacji Neuropsychologicznej;* Wydawnictwo Naukowe Scholar: Warszawa, 2008;
14. Conforto, A.B.; Machado, A.G.; Menezes, I.; Ribeiro, N.H. V.; Luccas, R.; Pires, D.S.; Leite, C. da C.; Plow, E.B.; Cohen, L.G. Treatment of Upper Limb Paresis With Repetitive Peripheral Nerve Sensory Stimulation and Motor Training: Study Protocol for a Randomized Controlled Trial. *Front. Neurol.* 2020, 11, doi:10.3389/fneur.2020.00196.

15. Raghavan, P. Upper Limb Motor Impairment After Stroke. *Phys. Med. Rehabil. Clin. N. Am.* 2015, 26, 599–610, doi:10.1016/j.pmr.2015.06.008.
16. Angerhöfer, C.; Colucci, A.; Vermehren, M.; Hömberg, V.; Soekadar, S.R. Post-Stroke Rehabilitation of Severe Upper Limb Paresis in Germany – Toward Long-Term Treatment With Brain-Computer Interfaces. *Front. Neurol.* 2021, 12, 599–610, doi:10.3389/fneur.2021.772199.
17. Powers, W.J.; Rabinstein, A.A.; Ackerson, T.; Adeoye, O.M.; Bambakidis, N.C.; Becker, K.; Biller, J.; Brown, M.; Demaerschalk, B.M.; Hoh, B.; et al. 2018 Guidelines for the Early Management of Patients With Acute Ischemic Stroke: A Guideline for Healthcare Professionals From the American Heart Association/American Stroke Association. *Stroke* 2018, 49, doi:10.1161/STR.000000000000158.
18. Kleindorfer, D.O.; Towfighi, A.; Chaturvedi, S.; Cockroft, K.M.; Gutierrez, J.; Lombardi-Hill, D.; Kamel, H.; Kernan, W.N.; Kittner, S.J.; Leira, E.C.; et al. 2021 Guideline for the Prevention of Stroke in Patients With Stroke and Transient Ischemic Attack: A Guideline From the American Heart Association/American Stroke Association. *Stroke* 2021, 52, doi:10.1161/STR.0000000000000375.
19. Legg, L.; Langhorne, P. Rehabilitation Therapy Services for Stroke Patients Living at Home: Systematic Review of Randomised Trials. *Lancet* 2004, 363, 352–356, doi:10.1016/S0140-6736(04)15434-2.
20. P. Conti, R.; Arnone, J.M. Unilateral Neglect: Assessment and Rehabilitation. *Int. J. Neurosci. Behav. Sci.* 2016, 4, 1–10, doi:10.13189/ijnbs.2016.040101.
21. Oujamaa, L.; Relave, I.; Froger, J.; Mottet, D.; Pelissier, J.-Y. Rehabilitation of Arm Function after Stroke. Literature Review. *Ann. Phys. Rehabil. Med.* 2009, 52, 269–293, doi:10.1016/j.rehab.2008.10.003.
22. Pomeroy, V.; Aglioti, S.M.; Mark, V.W.; McFarland, D.; Stinear, C.; Wolf, S.L.; Corbetta, M.; Fitzpatrick, S.M. Neurological Principles and Rehabilitation of Action Disorders. *Neurorehabil. Neural Repair* 2011, 25, 33S-43S, doi:10.1177/1545968311410942.
23. Morse, H.; Biggart, L.; Pomeroy, V.; Rossit, S. Exploring Perspectives from Stroke Survivors, Carers and Clinicians on Virtual Reality as a Precursor to Using Telerehabilitation for Spatial Neglect Post-Stroke. *Neuropsychol. Rehabil.* 2022, 32, 767–791, doi:10.1080/09602011.2020.1819827.
24. Yu, J.; Park, J. The Effect of First-person Perspective Action Observation Training on Upper Extremity Function and Activity of Daily Living of Chronic Stroke Patients. *Brain Behav.* 2022, 12, doi:10.1002/brb3.2565.
25. Borges, L.R.; Fernandes, A.B.; Melo, L.P.; Guerra, R.O.; Campos, T.F. Action Observation for Upper Limb Rehabilitation after Stroke. *Cochrane Database Syst. Rev.* 2018, 2018, doi:10.1002/14651858.CD011887.pub2.
26. Błażejewska-Hyżorek, B.; Czernuszenko, A.; Członkowska, A.; Ferens, A.; Gąsecki, D.; Kaczorowski, R.; Karaszewski, B.; Karliński, M.; Kaźmierski, R.; Kłysz, B.; et al. Wytyczne Postępowania w Udarze Mózgu. *Pol. Przegląd Neurol.* 2019, 15, 1–156, doi:10.5603/PPN.2019.0001.

27. Tynterova, A.; Shusharina, N.; Barantsevich, E.; Khoymov, M.; Rozhdestvensky, A. Virtual Reality Technology in Personalized Rehabilitation of Patients with Acute Ischemic Stroke. *Eur. Phys. J. Spec. Top.* 2024, *233*, 723–731, doi:10.1140/epjs/s11734-023-01079-x.
28. Bouatrous, A.; Meziane, A.; Zenati, N.; Hamitouche, C. An Interactive Virtual Reality System Based on Leap Motion Controller for Hand Motor Rehabilitation. In Proceedings of the 2024 8th International Conference on Image and Signal Processing and their Applications (ISPA); IEEE, April 21 2024; pp. 1–5.
29. Fan, T.; Wang, X.; Song, X.; Zhao, G.; Zhang, Z. Research Status and Emerging Trends in Virtual Reality Rehabilitation: Bibliometric and Knowledge Graph Study. *JMIR Serious Games* 2023, *11*, e41091, doi:10.2196/41091.
30. Aderinto, N.; Olatunji, G.; Abdulbasit, M.O.; Edun, M.; Aboderin, G.; Egbunu, E. Exploring the Efficacy of Virtual Reality-Based Rehabilitation in Stroke: A Narrative Review of Current Evidence. *Ann. Med.* 2023, *55*, doi:10.1080/07853890.2023.2285907.
31. Cortés-Pérez, I.; Nieto-Escamez, F.A.; Obrero-Gaitán, E. Immersive Virtual Reality in Stroke Patients as a New Approach for Reducing Postural Disabilities and Falls Risk: A Case Series. *Brain Sci.* 2020, *10*, 296, doi:10.3390/brainsci10050296.
32. Fang, Z.; Wu, T.; Lv, M.; Chen, M.; Zeng, Z.; Qian, J.; Chen, W.; Jiang, S.; Zhang, J. Effect of Traditional Plus Virtual Reality Rehabilitation on Prognosis of Stroke Survivors. *Am. J. Phys. Med. Rehabil.* 2022, *101*, 217–228, doi:10.1097/PHM.0000000000001775.
33. Rodríguez-Hernández, M.; Criado-Álvarez, J.-J.; Corregidor-Sánchez, A.-I.; Martín-Conty, J.L.; Mohedano-Moriano, A.; Polonio-López, B. Effects of Virtual Reality-Based Therapy on Quality of Life of Patients with Subacute Stroke: A Three-Month Follow-Up Randomized Controlled Trial. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2021, *18*, 2810, doi:10.3390/ijerph18062810.
34. Sveistrup, H. Motor Rehabilitation Using Virtual Reality. *J. Neuroeng. Rehabil.* 2004, *1*, 10, doi:10.1186/1743-0003-1-10.
35. Rose, T.; Nam, C.S.; Chen, K.B. Immersion of Virtual Reality for Rehabilitation – Review. *Appl. Ergon.* 2018, *69*, 153–161, doi:10.1016/j.apergo.2018.01.009.
36. Dordevic, M.; Maile, O.; Das, A.; Kundu, S.; Haun, C.; Baier, B.; Müller, N.G. A Comparison of Immersive vs. Non-Immersive Virtual Reality Exercises for the Upper Limb: A Functional Near-Infrared Spectroscopy Pilot Study with Healthy Participants. *J. Clin. Med.* 2023, *12*, 5781, doi:10.3390/jcm12185781.
37. Fusco, A.; Tieri, G. Challenges and Perspectives for Clinical Applications of Immersive and Non-Immersive Virtual Reality. *J. Clin. Med.* 2022, *11*, 4540, doi:10.3390/jcm11154540.
38. Corbetta, D.; Imeri, F.; Gatti, R. Rehabilitation That Incorporates Virtual Reality Is More Effective than Standard Rehabilitation for Improving Walking Speed, Balance and Mobility after Stroke: A Systematic Review. *J. Physiother.* 2015, *61*, 117–124, doi:10.1016/j.jphys.2015.05.017.
39. Matys-Popielska, K.; Popielski, K.; Sibilska-Mroziewicz, A. Study of the Possibility of Using Virtual Reality Application in Rehabilitation among Elderly Post-Stroke Patients. *Sensors* 2024, *24*, 2745, doi:10.3390/s24092745.

40. Matys-Popielska, K.; Popielski, K.; Matys, P.; Sibilska-Mroziewicz, A. Immersive Virtual Reality Application for Rehabilitation in Unilateral Spatial Neglect: A Promising New Frontier in Post-Stroke Rehabilitation. *Appl. Sci.* 2024, *14*, 425, doi:10.3390/app14010425.
41. Ramaseri Chandra, A.N.; El Jamiy, F.; Reza, H. A Systematic Survey on Cybersickness in Virtual Environments. *Computers* 2022, *11*, 51, doi:10.3390/computers11040051.
42. Kim, H.; Kim, D.J.; Chung, W.H.; Park, K.-A.; Kim, J.D.K.; Kim, D.; Kim, K.; Jeon, H.J. Clinical Predictors of Cybersickness in Virtual Reality (VR) among Highly Stressed People. *Sci. Rep.* 2021, *11*, 12139, doi:10.1038/s41598-021-91573-w.
43. Yildirim, C. Don't Make Me Sick: Investigating the Incidence of Cybersickness in Commercial Virtual Reality Headsets. *Virtual Real.* 2020, *24*, 231–239, doi:10.1007/s10055-019-00401-0.