

MAGDALENA PRUSZYŃSKA, SŁAWOMIR K. TADEJA,
MARCIN ŚWIĄTCZAK, JOANNA KOSTKA

ZASTOSOWANIE INTERFEJSÓW WIRTUALNYCH I INNYCH CYFROWYCH TECHNOLOGII W REHABILITACJI



MAGDALENA PRUSZYŃSKA^{1*} , SŁAWOMIR K. TADEJA² ,
MARCIN ŚWIĄTCZAK¹ , JOANNA KOSTKA³ 

ZASTOSOWANIE INTERFEJSÓW WIRTUALNYCH I INNYCH CYFROWYCH TECHNOLOGII W REHABILITACJI

APPLICATION OF VIRTUAL INTERFACES
AND OTHER DIGITAL TECHNOLOGIES
IN REHABILITATION

¹ Klinika Rehabilitacji Ortopedycznej i Pourazowej, Uniwersytet Medyczny w Łodzi, Plac Hallera 1;
magdalena.pruszyńska@umed.lodz.pl, marcin.swiatczak@umed.lodz.pl

² Zakład Technologii Gier, Uniwersytet Jagielloński; slawomir.tadeja@uj.edu.pl

³ Zakład Gerontologii, Uniwersytet Medyczny w Łodzi; joanna.kostka@umed.lodz.pl

* magdalena.pruszyńska@umed.lodz.pl; tel. +48 42 639 30 76

Seria monografii naukowych dotyczących zagadnień z zakresu dyscyplin nauk farmaceutycznych, nauk medycznych i nauk o zdrowiu.

Wydawnictwo recenzowane i punktowane na zasadach zgodnych z Rozporządzeniem MNiSW z dnia 22 lutego 2019 r. w sprawie ewaluacji jakości działalności naukowej (Dz.U. 2019 poz. 392 z późn. zm.).

RADA NAUKOWA

dr hab. Monika A. Olszewska, prof. uczelni – Redaktor naczelna
prof. dr hab. Monika Łukomska-Szymańska – Zastępca redaktor naczelnej
prof. dr hab. Iwona Cygankiewicz
dr hab. Małgorzata Pikala, prof. uczelni

REDAKTOR PROWADZĄCA

dr hab. Małgorzata Pikala, prof. uczelni

REDAKCJA TECHNICZNA

Magdalena Kokosińska, Anna Sikorska

OPRACOWANIE GRAFICZNE

Tomasz Przybył

ZASTOSOWANIE INTERFEJSÓW WIRTUALNYCH I INNYCH CYFROWYCH TECHNOLOGII W REHABILITACJI

Łódź 2022

WYDAWNICTWO UNIwersYTETU MEDYCZNEGO W ŁODZI

<http://wydawnictwo.umed.pl/>

e-mail: editorial@reports.umed.pl

Unikatowy identyfikator Wydawnictwa: 60000

(Komunikat Ministra Edukacji i Nauki z dnia 22 lipca 2021 r. w sprawie wykazu wydawnictw publikujących recenzowane monografie naukowe)

ISBN 978-83-67198-15-8

WYDANIE PIERWSZE



© 2022. Pewne prawa zastrzeżone na rzecz autorów. Opublikowane na licencji Creative Commons Uznanie Autorstwa (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode.pl>).

Licencjobiorca: Wydawnictwo Uniwersytetu Medycznego w Łodzi. Zezwala się na wykorzystanie treści monografii zgodnie z licencją – pod warunkiem zachowania niniejszej informacji licencyjnej oraz wskazania autorów jako właścicieli praw do tekstu.

Streszczenie: Podstawą fizjoterapii są systematyczne ćwiczenia ruchowe dostosowane zarówno do stadium zaawansowania choroby, jak i tolerancji wysiłku przez pacjenta. Pomimo oczywistych korzyści wynikających z tego procesu dostęp do usług rehabilitacyjnych jest ograniczony. Uzasadnia to potrzebę poszukiwania nowych rozwiązań, które istotnie wpłynęłyby na zwiększenie dostępności do tego typu świadczeń medycznych, a jednocześnie byłyby skuteczne, dobrze tolerowane przez chorych i efektywne kosztowo. Dodatkowo w sytuacjach epidemii zyskują na wartości interwencje, które mogą być wykonywane zdalnie, czyli za pośrednictwem różnego rodzaju systemów komunikacji elektronicznej. Taka forma usprawniania często określana jest mianem tzw. telerehabilitacji.

Dynamiczny rozwój technologii teleinformatycznych, w szczególności różnorodnych dwu- (2D) i trójwymiarowych (3D) środowisk komputerowych oraz innych pokrewnych technologii cyfrowych, stwarza możliwości ich użycia w różnych obszarach medycyny. Dzięki szerokiemu spektrum dostępnych technik interakcji pomiędzy takim systemem a użytkownikiem tego typu interfejsy mogą być z powodzeniem stosowane m.in. w nowoczesnych programach rehabilitacji. W przyszłości prym mogą wieść tak zwane: mieszana rzeczywistość (ang. *mixed reality*, MR) oraz rozszerzona rzeczywistość (ang. *augmented reality*, AR), które obok wirtualnej rzeczywistości (ang. *virtual reality*, VR) stanowią główne gałęzie rozwoju interfejsów immersyjnych. Badania na temat skuteczności metod usprawniania opartych na nowoczesnych technologiach cyfrowych prowadzone są w różnych grupach pacjentów, jednakże najwięcej doniesień naukowych dotyczy neurorehabilitacji. W ostatnim czasie przybiera również przykładów wykorzystania takich komputerowych systemów w populacji osób starszych. Cyfrową rehabilitację stosuje się w programach naceLOWanych na odbudowę funkcji motorycznych, poznawczych, a także w psychoterapii. Obecne dowody na przewagę skuteczności wirtualnej rehabilitacji nad ćwiczeniami w klasycznej formie są niewystarczające, jednak trening tego typu może stać się wartościowym uzupełnieniem konwencjonalnej terapii.

Celem niniejszej pracy jest próba uporządkowania podstawowych terminów związanych z wykorzystaniem nowoczesnych technologii w rehabilitacji, w tym różnorodnych interfejsów wirtualnych oferowanych przez technologie immersyjne i nieimmersyjne. Omówiono przykłady włączenia różnych form cyfrowej rehabilitacji w proces usprawniania wybranych grup pacjentów oraz korzyści i ograniczenia związane z ich stosowaniem. Podjęto próbę identyfikacji czynników mogących zwiększyć efektywność takich form terapii. Ponadto przedstawiono dwa wybrane systemy rehabilitacji oparte na cyfrowych technologiach: *Neuroforma* oraz *SeeMe*.

Słowa kluczowe: interfejs wirtualny, interfejs immersyjny, technologie cyfrowe, cyfrowa rehabilitacja, wirtualna rehabilitacja, wirtualne środowisko, wirtualna rzeczywistość, rozszerzona rzeczywistość, mieszana rzeczywistość

Abstract: The basis of physiotherapy is a systematic physical exercise adapted to the stage of the disease and exercise tolerance. However, despite the clear benefits of such an approach, access to rehabilitation services is still limited. This justifies the need to look for new solutions that would significantly increase access to this type of medical service while simultaneously being effective, well-tolerated by patients, and cost-effective. Additionally, in an epidemic situation, interventions that can be performed remotely, i.e., via various forms of electronic communication, are only gaining more importance. These types of interventions are often referred to as the so-called tele-rehabilitation.

The dynamic development of information and communications technologies (ICT), including various two- (2D) and three-dimensional (3D) computer environments and systems, opens up a range of medical applications. Thanks to the wide range of possible interaction techniques between the system and its user, such interfaces can be successfully used to support the patient rehabilitation process. Currently, a vast and growing number of such applications rely on mixed reality (MR) and augmented reality (AR), which along with virtual reality (VR) are the main branches of immersive technologies. Research on the application of modern technologies in rehabilitation is conducted within various groups of patients. However, most reported work concerns neurorehabilitation. Recently, there has also been an increase in research related to these forms of therapy in the elderly population. In addition to rehabilitation supporting motor function, digital rehabilitation is aimed at restoring cognitive function as well as in psychotherapy. Nevertheless, current evidence for the superiority of virtual rehabilitation over exercise in its classical form is insufficient. On the other hand, training of this type can become a valuable complement to conventional therapy.

The aim of this paper is a tentative attempt to organize basic terms related to the use of various digital technologies in rehabilitation, including the immersive and other types of non-immersive, virtual interfaces. We also discuss examples of different forms of digital rehabilitation as well as the benefits and limitations related to their use in selected patient groups. An attempt was made to identify factors that could increase the effectiveness of such forms of therapy. Moreover, we describe two programs exerting digital technologies in the process of patient rehabilitation: *Neuroforma* and *SeeMe*.

Keywords: virtual interface, immersive interface, digital technologies, digital rehabilitation, virtual rehabilitation, virtual environment, virtual reality, augmented reality, mixed reality

Wykaz skrótów

- AR** – rozszerzona rzeczywistość (ang. *augmented reality*)
- BADL** – podstawowe czynności dnia codziennego (ang. *basic activities of daily living*)
- CAVE** – automatyczne wirtualne środowisko, „wirtualna jaskinia” (ang. *cave automatic virtual environment*)
- CG** – gry komercyjne (konsolowe gry komputerowe) (ang. *commercial gaming*)
- FPP** – perspektywa pierwszoosobowa (ang. *first-person perspective*)
- FS** – zespół słabości/kruchości (ang. *frailty syndrome*)
- HCI** – interakcja użytkownik–komputer (ang. *human-computer interaction*)
- IADL** – złożone/instrumentalne czynności dnia codziennego (ang. *instrumental activities of daily living*)
- ICF** – Międzynarodowa Klasyfikacja Funkcjonowania, Niepełnosprawności i Zdrowia (ang. *International Classification of Functioning, Disability and Health*)
- ICT** – technologie informacyjno-komunikacyjne (ang. *information and communications technologies*)
- ISVR** – Międzynarodowe Towarzystwo Rehabilitacji Wirtualnej (ang. *International Society for Virtual Rehabilitation*)
- MCI** – łagodne zaburzenia poznawcze (ang. *mild cognitive impairment*)
- MPD** – mózgowe porażenie dziecięce
- MR** – mieszana rzeczywistość (ang. *mixed reality*)
- PD** – choroba Parkinsona (ang. *Parkinson's disease*)
- SG** – gry poważne (ang. *serious games*)
- SM** – stwardnienie rozsiane (łac. *sclerosis multiplex*)
- TPP** – perspektywa trzeciej osoby (ang. *third-person perspective*)
- UM** – udar mózgu
- VE** – wirtualne środowisko (ang. *virtual environment*)
- VR** – wirtualna rzeczywistość (ang. *virtual reality*)

1. Wprowadzenie

Systematyczne ćwiczenia ruchowe, dostosowane do stadium zaawansowania choroby i tolerancji wysiłku, wpływają pozytywnie na sprawność funkcjonalną pacjenta. Mogą przyczynić się do zwiększenia samodzielności w życiu codziennym oraz zmniejszenia częstości występowania powikłań (Vert i in., 2019). Odpowiednio dobrane programy usprawniania kształtują takie cechy motoryczne jak: siła, gibkość, koordynacja czy równowaga, wpływają także na redukcję stresu i poprawę nastroju ćwiczącego oraz korzystną modyfikację czynników ryzyka chorób przewlekłych (Piercy i in., 2018). Istnieją także doniesienia wskazujące na pozytywne działanie aktywności fizycznej na strukturę i czynność ośrodkowego układu nerwowego (Morgan i in., 2015).

Rosnąca populacja osób starszych, przewlekle chorych oraz niesamodzielnych zwiększa zapotrzebowanie na rehabilitację w warunkach stacjonarnych, ambulatoryjnych, a także na ćwiczenia prowadzone bezpośrednio w domu pacjenta. Ograniczona dostępność wielu form usprawniania uzasadnia wymóg poszukiwania nowych rozwiązań, które istotnie wpłynęłyby na uzupełnienie oferty świadczeń medycznych w Polsce.

Potrzeba zwiększenia dostępności rehabilitacji wymusza konieczność wprowadzania bardziej skutecznych strategii, które spełniałyby również kryteria takie jak: efektywność kosztowa, łatwość organizacyjna, dobra tolerancja przez chorych. Niezwykle istotnym aspektem jest zapewnienie wszechstronności i ciągłości tego procesu. Optymalne programy rehabilitacji powinny być kompleksowe i oddziaływać nie tylko na funkcje ruchowe. Takie podejście wydaje się być zbyt minimalistyczne i nie w pełni odpowiadające na potrzeby pacjenta. Pożądanym elementem jest również możliwość stosowania lub kontynuowania usprawniania w domu. Ponadto program terapii powinien być dostosowywany do indywidualnych potrzeb i możliwości pacjenta. Należy w nim uwzględniać odpowiedni dobór ćwiczeń, ich intensywność, a także szereg czynników mogących stanowić przeszkodę w podejmowaniu danej aktywności. Zbyt mała częstotliwość i krótki czas trwania ćwiczeń wiążą się z gorszymi efektami funkcjonalnymi dla usprawnianych chorych (Kwakkel i in., 2004). Korzystne jest wprowadzenie systemów wspierających zarówno samych pacjentów, jak również ich rodziny i opiekunów w zakresie szczegółowych zaleceń fizjoterapii oraz jak najwcześniejsze i aktywne włączenie ich do tego procesu (Fang i in., 2017). Dodatkowo, w warunkach epidemii, zyskują na wartości interwencje, które mogą być wykonywane zdalnie, tj. na odległość – za pośrednictwem różnego rodzaju systemów komunikacji elektronicznej w ramach tzw. telemedycyny (Mantovani i in., 2020; Turolla i in., 2020). Uważa się, że nie należy traktować tego rodzaju pieczy medycznej jako odrębnej gałęzi medycyny (Paszowska 2020). To innowacyjny sposób świadczenia opieki zdrowotnej, który ma służyć poprawie jej skuteczności, wydajności oraz dostępności (Nesbitt i in., 2000). Taka forma zdalnej rehabilitacji określana jest przez wielu autorów mianem telerehabilitacji (Mantovani i in., 2020; Paszowska, 2020; Turolla i in., 2020).

Obiecującym rozwiązaniem wydaje się być wykorzystanie w procesie rehabilitacji nowoczesnych technologii informatycznych, takich jak różnego typu interfejsy wirtualne, w tym w szczególności interfejsy immersyjne, niekiedy grupowane również jako interfejsy przestrzenne lub 3D (ang. *3-dimensional*, 3D) (Sutherland, 1968). Pozwalają one na umieszczenie w polu widzenia użytkownika dodatkowych dwu- lub trójwymiarowych treści (obiektów/modeli) cyfrowych. Ponadto interfejsy te niejako nadają „głębi” wspomnianym obiektom, co wywołuje u użytkownika poczucie „zanurzenia” (ang. *immersion*) w świecie całkowicie wygenerowanym komputerowo bądź wzbogaconym o cyfrowe artefakty. To stosunkowo nowy rodzaj oddziaływania, będący ciekawą alternatywą dla tradycyjnych form usprawniania. Można wyróżnić trzy główne gałęzie technologii realizujących założenia interfejsu immersyjnego (Milgram i in., 1995):

- wirtualna rzeczywistość (ang. *virtual reality*, VR),
- rozszerzona rzeczywistość (ang. *augmented reality*, AR),
- mieszana rzeczywistość (ang. *mixed reality*, MR).

Mają one obecnie wiele potencjalnych zastosowań w licznych dziedzinach, również medycznych (Li i in., 2017). Wykorzystanie cyfrowych technologii, dzięki którym możliwe jest doznanie wrażeń

nia przebywania w kreowanym komputerowo środowisku (Lorenz i in., 2018) oraz wchodzenie z nim w interakcję (Sutherland, 1968), stwarza nowe perspektywy dla rehabilitacji. Warto tutaj zwrócić uwagę, że rozwój badań nad terapią z użyciem takich interfejsów rozpoczął się prawie trzy dekady temu (North i in., 1997). Natomiast w 2009 roku powołano Międzynarodowe Towarzystwo Rehabilitacji Wirtualnej (ang. International Society for Virtual Rehabilitation, ISVR), które nie tylko inicjuje działalność naukowo-badawczą w zakresie wirtualnej rehabilitacji (z wykorzystaniem wirtualnej rzeczywistości) i telerehabilitacji (z użyciem form komunikacji na odległość), lecz także sprzyja wymianie informacji oraz zacieśnianiu współpracy między środowiskiem medycznym, naukowym oraz specjalistami z innych, pozamedycznych dziedzin.

Celem niniejszej pracy jest próba wstępnego przeglądu oraz uporządkowania podstawowej terminologii związanej z wykorzystaniem cyfrowych technologii w procesie rehabilitacji ze szczególnym uwzględnieniem interfejsów immersyjnych. Należy zwrócić uwagę, że ze względu na relatywnie nowy oraz dynamiczny rozwój tychże technologii ich słownictwo nie jest do końca klarowne, a granice pomiędzy poszczególnymi gałęziami bywają płynne i są dość umowne, zaś badacze stosują różne metody ich klasyfikacji. W pracy pokrótce przedstawiono i omówiono najpopularniejsze podejście zaproponowane przez Milgrama i in. (1995), bazujące na podziale ze względu na ilość cyfrowo generowanej treści pokazywanej użytkownikowi za pomocą wybranego typu urządzenia. Z uwagi na dużą rozbieżność pomiędzy nazewnictwem i klasyfikacją stosowaną przez różnych autorów w rozdziałach będących przeglądem dotychczasowych wyników badań, postanowiono, przynajmniej częściowo, zachować nomenklaturę stosowaną w danej publikacji.

Omówiono również korzyści i ograniczenia wynikające z praktycznego zastosowania tego typu innowacyjnych rozwiązań w oparciu o przegląd literatury naukowej i doświadczenia własne zdobyte w pracy z dwoma programami wykorzystującymi nowoczesne technologie cyfrowe: systemem *Neuroforma* „do stacjonarnej i zdalnej rehabilitacji” (*Neuroforma*) oraz „w pełni skomputeryzowanym” programem *SeeMe* (*SeeMe Rehabilitacja*). W związku z bardzo dynamicznym rozwojem wyżej wymienionych technologii wykorzystanie możliwości rozbudowanej interakcji pacjenta z generowanym komputerowo środowiskiem w rehabilitacji stało się coraz powszechniejszą praktyką. Podjęto próbę identyfikacji komponentów takich systemów, które mogą wiązać się ze zwiększeniem efektywności tego typu interwencji. W niniejszej monografii przedstawiono także możliwości i wyniki zastosowania tej formy terapii dla różnych grup pacjentów ze szczególnym uwzględnieniem chorych po udarze mózgu (UM) oraz osób starszych.

2. Podstawowa klasyfikacja interfejsów immersyjnych

Stosunkowo często przyjmuje się, że to Ivan Sutherland jest jednym z pionierów i głównych pomysłodawców interfejsu, który umożliwia jego użytkownikowi wchodzenie w interakcje z elementami trójwymiarowej przestrzeni wirtualnej w podobny sposób, jak to ma miejsce w świecie rzeczywistym (Sutherland, 1968). Obecnie do określenia tego typu interfejsów użytkownika, czyli warstwy systemu odpowiadającej za interakcje pomiędzy danym systemem a jego użytkownikiem, używa się przeważnie przymiotników „immersyjny” lub „przestrzenny”, czasami również można spotkać określenie „3D”, oznaczające interfejs trójwymiarowy (ang. *3-dimensional*, 3D). To pierwsze, znacznie częściej używane określenie, pochodzi od angielskiego słowa *immersion* i nawiązuje do tego, iż interfejs immersyjny pozwala użytkownikowi niejako na zanurzenie się w świecie wirtualnym oraz postrzeganie swoistej głębi przedstawianych treści trójwymiarowych (3D) (Hudson i in., 2019).

Literatura przedmiotu przytacza kilka sposobów klasyfikowania omawianych interfejsów, aczkolwiek wydaje się, iż najczęściej stosuje się podział zaproponowany przez Milgrama i in. (1995). W swej pracy autorzy zaproponowali, aby umieścić wszelkie rodzaje interfejsów immersyjnych na spektrum obrazującym to, jaka ilość (tzn. jak wielki fragment) przedstawianej treści została wygenerowana cyfrowo. Przyjęli oni jednocześnie, iż na jednym z krańców owego spektrum znajduje się rzeczywistość realna odbierana za pomocą zmysłów człowieka (brak treści cyfrowych), zaś na przeciwległym jego krańcu – rzeczywistość wirtualna, stworzoną całkowicie komputerowo

(Milgram i in., 1995). Jeśli przyjmie się podobny punkt widzenia, w dużym uproszczeniu można ostrożnie przyjąć, iż blisko obu krańców znajdują się odpowiednio: rozszerzona rzeczywistość (AR) oraz wirtualna rzeczywistość (VR), natomiast przestrzeń pomiędzy nimi wypełniają wszelkiego rodzaju kombinacje, określane często jako mieszana rzeczywistość (MR). We wszystkich przypadkach głównym sposobem dostarczania treści użytkownikowi jest wykorzystanie zmysłu wzroku oraz wizualnego kanału komunikacji, aczkolwiek z samymi elementami wizualizacji (np. modelami 3D, tekstem czy też obrazami 2D) użytkownik może wchodzić w interakcje na wiele różnych sposobów przy wykorzystaniu pozostałych zmysłów np. słuchu czy dotyku.

W przypadku AR użytkownikowi prezentowana jest dodatkowa, generowana cyfrowo treść, którą nakłada się na jego pole widzenia. Treść ta niejako „rozszerza” rzeczywistość odbieraną zmysłami człowieka. Jako przykład można tutaj podać system, który na obraz uchwycony za pomocą kamery internetowej nakłada dodatkowe, wygenerowane komputerowo elementy. Przykładem aplikacji wykorzystującej pewną formę interfejsu AR/MR jest system *Neuroforma* zaprezentowany na rycinie 1.



Rycina 1. System cyfrowej rehabilitacji z biofeedbackiem (*Neuroforma*) – interaktywne ćwiczenia w AR/MR, zadanie „Maszyna” – dotykanie zapalonych białych świateł (po dotknięciu zmieniają kolor na zielone), obustronne, symetryczne ruchy kończyn górnych, lustrzane odbicie postaci użytkownika.

Natomiast w przypadku nowoczesnych zastosowań VR najczęściej rozważa się wykorzystanie gogli, odcinających rzeczywisty obraz otoczenia użytkownika, powiązanych ze swoistym przejęciem kontroli nad tym, co użytkownik odbiera zmysłem wzroku poprzez całkowitą, komputerową symulację jego pola widzenia. Istnieją również interfejsy, które w różnym stopniu i/lub wybiórczo korzystają z obu elementów (tj. AR i VR), czyli wspomniane wcześniej MR. Przykładem zastosowania technologii cyfrowych czerpiących z podejścia AR/MR w rehabilitacji jest także system *SeeMe*, który niejako łączy obraz z kamery i umiejscawia go w świecie wirtualnym kreowanym komputerowo. Fakt, że system ten wykorzystuje do prezentacji treści ekran 2D (Ryc. 2), a nie gogle lub system typu CAVE (ang. *Cave Automatic Virtual Environment*) (Cruz-Neira i in., 1993) niejako wzbudza wątpliwości, czy można zaklasyfikować go jako system typu VR w kontekście „zanurzenia” użytkownika w trójwymiarowej przestrzeni wirtualnej.



Rycina 2. System komputerowej rehabilitacji z biofeedbackiem (*SeeMe*), zadanie „Cleaner” – symulacja czyszczenia okna wykonywana w pozycji siedzącej, obustronne, asymetryczne ruchy kończyn górnych, możliwość zaplanowania zakresu aktywności ruchowej (obszaru brudnej szyby), lustrzane odbicie postaci użytkownika.

Warto podkreślić, iż na chwilę obecną nie ma ścisłej oraz jednoznacznej, akceptowalnej zarówno przez środowisko naukowe, jak i pozaakademickie, definicji przynależności systemu do wybranej gałęzi technologii immersyjnych. W dużej mierze decyzja ta jest subiektywna i pozostaje w gestii osoby dokonującej przyporządkowania oraz posiadanej przez nią intuicji, która bazuje na dotychczasowym doświadczeniu styczności z różnymi realizacjami interfejsu immersyjnego. Najczęściej jesteśmy w stanie względnie łatwo przyporządkować dany system do VR lub AR, a w przypadku trudności można rozważyć, czy nie mamy do czynienia z jakąś formą MR.

Innym sposobem klasyfikacji interfejsów immersyjnych jest ich podział ze względu na rodzaj urządzenia wykorzystywanego do zapewnienia efektu immersji. Najczęściej rozważa się tutaj specjalne gogle lub wykorzystuje urządzenia mobilne, takie jak nowoczesne smartfony czy tablety. Możliwe jest także zastosowanie innego systemu, np. CAVE, gdzie używa się specjalnie przygotowanej projekcji wyświetlanej na prostopadłych do siebie ścianach pomieszczenia (Cruz-Neira, i in., 1993).

Rodzaj wykorzystanego urządzenia wpływa również na to, w jaki sposób jego użytkownik jest w stanie komunikować się i wchodzić w interakcję ze światem rzeczywistym czy też samym systemem immersyjnym. Niektóre urządzenia najnowszej generacji, zarówno w przypadku AR, jak i VR, są w stanie w czasie rzeczywistym analizować ruchy gałki ocznej użytkownika, co umożliwia automatyczne śledzenie oraz rozpoznawanie miejsca czy też obiektu, na którym w danej chwili użytkownik skupia swój wzrok. Funkcjonalności tej można użyć w celu np. zasygnalizowania systemowi, z jakim obiektem (wirtualnym lub rzeczywistym) użytkownik chce wejść w interakcję w danej chwili. Równocześnie system może na tej podstawie, np. za pomocą podświetlenia danego obiektu, zasygnalizować, że wie, który obiekt zwrócił uwagę użytkownika. W ten sposób mechanizm może również informować, że dany obiekt (tj. wirtualny model 3D) jest interaktywny. Najnowsze obecnie modele gogli AR/VR/MR, takie jak np. gogle AR (Microsoft HoloLens) czy też gogle VR np. Vive Pro Eye (Vive Pro Eye) posiadają wbudowaną możliwość śledzenia ruchów gałki ocznej użytkownika w czasie rzeczywistym. Inne natomiast wymagają zakupu wyspecjalizowanych dodatkowych czujników np. Tobii Eye Tracker (Tobii VR Eye-Tracking). Wykorzystanie urządzeń mobilnych rzadko zapewnia podobne funkcjonalności.

Inną bardzo popularną formą interakcji z systemem immersyjnym jest wykorzystanie opcji śledzenia oraz rozpoznawania gestów dłoni użytkownika w czasie rzeczywistym. Wykorzystanie tej techniki pozwala na projektowanie jeszcze bardziej elastycznych interfejsów, które otwierają zupełnie nowe możliwości przygotowywania programów ćwiczeń uwzględniających precyzyjne ruchy rąk, a nawet poszczególnych palców pacjenta. Gdy w danym systemie istnieje taka funkcjonalność, użytkownik nie musi polegać na trzymany w rękach kontrolerach, np. Oculus Touch (Oculus Rift Accessories), Xbox Gamepad Controller (Microsoft Xbox Controller) czy też Vive Controllers), które ograniczają sposób wykonania zadania ruchowego. Możliwość śledzenia oraz rozpoznawania gestów dłoni użytkownika jest obecnie wbudowana w niektóre urządzenia, np. we wspomniane gogle AR Microsoft HoloLens drugiej generacji, zaś aby uzyskać je w innych przypadkach, należy użyć dodatkowych, zewnętrznych sensorów. Jednym z najpopularniejszych rozwiązań jest wykorzystanie kontrolera Leap Motion (Ultra-Leap) – czujnika, który jest podłączony do komputera za pomocą kabla USB i umożliwia bardzo dokładne śledzenie ruchów w stawach: łokciowym, nadgarstkowym, a także stawach poszczególnych palców użytkownika. Może być wykorzystywany w zestawieniu z urządzeniami VR/AR/MR lub bez nich. Takie rozwiązanie stosowane jest m.in. w rehabilitacji chorych z zaburzeniami neurologicznymi (Cortés-Pérez i in., 2021). Ten sam producent oferuje również gamę czujników STRATOS umożliwiającą użycie sygnału ultradźwiękowego do wywołania u pacjenta efektu dotyku (ang. *haptic feedback*). Inną dostępną komercyjnie możliwością jest wykorzystanie różnego rodzaju rękawic lub elementów egzoszkieletu. Niektóre z tych urządzeń, poprzez użycie mechanizmów oddziaływania na ekstero- i proprioceptory ręki użytkownika, mogą wywołać u niego wrażenie nacisku na dany obiekt zgodne z fakturą, kształtem, ciężarem, jak i gęstością materiału, z którego dany wirtualny model został „zbudowany” np. rękawice Dexmo chińskiego producenta DextaRobotics (Dexmo Gloves).

Innym sposobem interakcji systemu immersyjnego z użytkownikiem jest sterowanie głosem – mechanizm rozpoznaje, przetwarza (ang. *speech-to-text*) i analizuje wypowiedzi użytkownika (ang. *natural language processing*, NLP), a następnie na ich podstawie wykonuje przekazane w ten sposób polecenie. Interfejs głosowy, wraz z synteizatorem ludzkiej mowy, może wesprzeć pacjenta w przeprowadzaniu bardziej skomplikowanych ćwiczeń. Taka pomoc może być realizowana np. poprzez dźwiękowe informowanie użytkownika o wynikach wykonywanego zadania, gdy aktualne ułożenie ciała uniemożliwia jednocześnie spoglądanie na ekran. Usługi automatycznego rozpoznawania i translacji mowy oferuje obecnie wiele platform internetowych (Google Cloud, Microsoft Azure). Funkcjonalność tę można też stosunkowo łatwo połączyć z immersyjnym systemem rehabilitacyjnym za pomocą przygotowanego przez producentów API (ang. *application programming interface*, API), szczególnie jeżeli dotyczy to rozpoznawania i wydawania prostych komend głosowych (Microsoft Azure).

Do najnowocześniejszych metod interakcji użytkownika z wybranym systemem należy wykorzystanie najnowszej generacji czujników rozpoznających i odczytujących mimikę twarzy np. specjalistyczne sensory Vive Facial Trackers (Vive Facial Tracker). Dane uzyskiwane z takiego typu sensora mogą zostać wykorzystane do próby odczytania emocji użytkownika (Marín-Morales i in., 2020), czyli jego reakcji psychofizycznych na określony bodziec, np. w trakcie wykonywania ćwiczenia.

Jak można łatwo wywnioskować, im większe możliwości interakcji posiada dany interfejs, tym bardziej zaawansowane zadania można wykonywać za jego pomocą. Niestety wiąże się to z wyższą ceną takich urządzeń zaś ich długie użytkowanie może spowodować u pacjenta uczucie zmęczenia lub nawet (szczególnie w przypadku gogli VR) wywołać objawy tzw. choroby symulatorowej (Stanney i in., 1997). W tym zakresie wykorzystanie sensorów ruchu, oraz ekranu monitora lub telewizora zamiast gogli wydaje się być rozwiązaniem dostępnym dla większej grupy osób, jako że nie powoduje dodatkowego obciążenia związanego z używaniem przenośnych wyświetlaczy lub ręcznych kontrolerów. Ponadto w procesie przygotowywania programu rehabilitacji nie ma konieczności uwzględniania aspektów takich jak np. ograniczenie pola widzenia pacjenta wynikających z użytkowania gogli.

3. Wirtualna (cyfrowa) rehabilitacja

Wirtualna rehabilitacja jest najczęściej definiowana jako „(...) rodzaj interfejsu użytkownik –komputer (ang. *human–computer interaction*, HCI), który obejmuje symulację czynności lub środowiska w czasie rzeczywistym, umożliwiając użytkownikowi interakcję z otoczeniem za pomocą działań motorycznych i systemów sensorycznych” (Aminov i in., 2018). Należy jednak podkreślić, że w tym kontekście przymiotnik „wirtualny” jest używany jako synonim słowa „cyfrowy”, tj. oparty na systemie komputerowym, co samo w sobie nie oznacza automatycznie zastosowania wirtualnej rzeczywistości (VR) rozumianej jako wcześniej opisany interfejs immersyjny.

Wymieniane w analizowanym piśmiennictwie tzw. interwencje VR są natomiast określane jako oparte na symulacji komputerowej rehabilitacyjny trening, w którym „(...) użytkownicy pojawiają się w środowisku wirtualnym w czasie rzeczywistym za pośrednictwem różnych trybów sensorycznych i wchodzą w interakcje z obrazami lub wirtualnymi obiektami” (Lei i in., 2019). Interwencje VR, termin stosowany przez wielu autorów cytowanych prac, wydaje się być w tym kontekście używany stosunkowo subiektywnie i przez to wprowadzać w błąd. Sytuacja taka może w szczególności dotyczyć osób zaznajomionych z technologiami immersyjnymi typu VR/AR/MR rozumianymi w sposób przedstawiony przez nas w poprzednich rozdziałach tej monografii.

Programy tak zwanej cyfrowej rehabilitacji znacznie się od siebie różnią, poczynając od wykorzystania niedrogich, komercyjnych konsoli, poprzez różnego rodzaju gry, aż po spersonalizowane systemy interaktywne. Powszechny w piśmiennictwie jest podział na dwie grupy. Pierwszą tworzą terapie związane z zastosowaniem wirtualnego środowiska, nazywane systemami VE (ang. *virtual environment*, VE). Należą do nich także specjalistyczne systemy komputerowe, np. system IREX (Lee, 2015) lub JINTRONIX (Cannell i in., 2018), które mogą być trudne do wdrożenia w ośrodkach czy w terapii domowej z uwagi na koszty ich zakupu i użytkowania. W tej zróżnicowanej grupie znajdują się również roboty rehabilitacyjne z systemem VE umożliwiające dodatkowe mechaniczne wspomaganie ruchu lub dodanie oporu, takie jak ARMEO (Colomer i in., 2013). Możemy tu też zaliczyć zasilane elektrycznie lub pneumatycznie, sterowane komputerowo ortozy (egzoszkielety), które ułatwiają odciążenie i wykonywanie prostych i złożonych ruchów kończyn oraz wspomagają reedukację chodu (Fisahn i in., 2016). Ćwiczenia lokomocji w wirtualnym środowisku przeprowadza się często z zastosowaniem dodatkowego oprzyrządowania, np. ram umożliwiających podwieszenie całego ciała (ang. *body-weight-supported*, BWS) oraz ruchomych bieżni (ang. *treadmill*, TM) (Masseti i in., 2016).

Druga grupa to coraz powszechniejsze w zastosowaniu konsolowe gry komputerowe (*Commercial Gaming*, CG), takie jak: Wii (Nintendo) czy Xbox (Microsoft), które stały się popularną, bardziej dostępną alternatywą dla specjalistycznych systemów VE (Warland i in., 2019). Platformy te zostały zaprojektowane z myślą o osobach zdrowych i mogą nie uwzględniać wielu ważnych w procesie reedukacji elementów, co może stanowić ich istotne ograniczenie w kontekście wykorzystania dla pacjentów.

W opinii wielu autorów obie grupy zapewniają dość dobre efekty treningowe (Aminov i in., 2018; Chen i in. 2018; Laver i in., 2017). Chociaż specjalistyczne interwencje VE uważa się za nieco lepsze (Chen i in. 2018; Laver i in., 2017), bardziej precyzyjne narzędzie, to wciąż brakuje dowodów na poparcie koncepcji dotyczącej większej skuteczności takich systemów. Zarówno VE, jak i CG dostarczają ćwiczącemu informację zwrotną o pozycji i ruchu w przestrzeni w czasie rzeczywistym całego ciała lub jego wybranych części. Wspólną cechą obu grup jest także zaangażowanie użytkownika, który dłużej niż podczas konwencjonalnego usprawniania aktywnie uczestniczy w wykonywaniu zadań ruchowych. Czynniki te, zwiększające intensywność terapii (liczbę powtórzeń oraz wydłużenie czasu uważnego udziału) przedstawia się, obok zadaniowego charakteru, jako decydujące o skuteczności (Brunner i in., 2016). Potrzeba jednak dalszych specjalistycznych, kierunkowych badań, aby potwierdzić i w pełni zrozumieć te rezultaty.

Dodatkowo warto zasygnalizować, że VE oraz CG posiadają cechy umożliwiające zaklasyfikowanie ich jako tzw. gier poważnych / gier edukacyjnych (ang. *serious games*) (Djaouti i in., 2011). Dzieje się tak dlatego, że ich wykorzystanie przekracza ramy podejścia czysto rozrywkowego i ma na celu osiągnięcie innych, bardziej pożądanых rezultatów, takich jak: nabycie przez gracza

nowych umiejętności (nauka), rozwój już posiadanych kompetencji (trening) czy potencjalne efekty zdrowotne (rehabilitacja).

Przegląd dostępnej literatury pokazuje, że nie ma jednoznacznego określenia dla immersyjnych metod rehabilitacyjnych. Część badaczy sprowadza je wyłącznie do systemów komputerowych związanych z użyciem specjalistycznych gogli, czyli zakładanego na głowę przenośnego wyświetlacza (ang. *head-mounted display*, HMD, np. Oculus Rift czy HTC Vive) lub wykorzystujących telefon komórkowy osadzony w specjalnych okularach np. Gear VR (Samsung Gear VR), które to urządzenia, w połączeniu z odpowiednim oprogramowaniem, umożliwiają interakcję ze stereoskopowym obrazem 3D. Za pomocą tego rodzaju przenośnych narzędzi lub przy wykorzystaniu systemów typu CAVE (Cruz-Neira i in., 1993) osiągany jest wysoki stopień interakcji, a także immersji („zanurzenia”) w środowisku wirtualnym (Hudson i in., 2019). Pozwala to użytkownikowi na doświadczanie zarówno całego wirtualnego świata, jak i jego poszczególnych elementów w bardzo realistyczny sposób.

3.1. Charakterystyka dwóch wybranych systemów cyfrowej rehabilitacji

Nowoczesne technologie cyfrowe mają ogromny potencjał w zakresie projektowania zindywidualizowanych, bogatych pod względem możliwości i treści, a równocześnie stosunkowo bezpiecznych środowisk rehabilitacji. Dzięki takim rozwiązaniom pacjent może „zanurzyć” się w relatywnie realistycznym, bo starającym się odwzorować prawa fizyki świata rzeczywistego, wirtualnym otoczeniu oraz wejść w sytuacje, które potencjalnie mogłyby być dla niego trudno dostępne. Poprzez odpowiednie przygotowanie środowiska generowanego cyfrowo, a także wybraną metodę interakcji użytkownika z systemem, jak również dzięki wykorzystaniu różnych rodzajów urządzeń realizujących idee interfejsu immersyjnego można w znaczący sposób wpłynąć na to, jak świat wirtualny jest odbierany przez użytkownika (Diemer i in., 2015). Ponadto w przypadku interfejsów komputerowych istnieje cała gama technik interakcji, jakie mogą zostać wykorzystane, poczynając od standardowych myszy i klawiatury komputerowej aż po śledzenie i rozpoznawanie gestów i ruchów poszczególnych części, a nawet całego ciała użytkownika systemu. W zależności od zastosowanego rozwiązania poziom aktywności fizycznej ćwiczącego może wahać się od niskiego (siedzenie przy klawiaturze) do bardzo wysokiego (ruchy całego ciała). Do tej ostatniej grupy należą dwa przedstawione w opracowaniu systemy: *Neuroforma* oraz *SeeMe*.

System *Neuroforma* dostępny jest w trzech wersjach:

- domowej (indywidualnej),
- związanej z nadzorem terapeuty i usługą telerehabilitacji,
- najnowszej, przeznaczonej dla ośrodków rehabilitacji. Ta część systemu przedstawiana jest jako „wielozadaniowe urządzenie do ćwiczeń ruchowych, poznawczych i kontroli równowagi (...) z elementami rozszerzonej rzeczywistości i biofeedbacku” (*Neuroforma PRO*).

SeeMe natomiast oprócz wersji podstawowej oferuje także dodatkowy moduł (*Virtual Interactive Shopper*), gdzie „(...) pacjent musi radzić sobie z sytuacjami życia codziennego, które napotyka się przy okazji robienia zakupów”. Na bazie doświadczeń uzyskanych w pracy z *SeeMe* powstał nowy, interaktywny, rozbudowany system rehabilitacji (*VAST.Rehab*).

Poniższe opracowanie zostało ograniczone do omówienia jedynie podstawowych wersji obu wyżej wymienionych systemów (*Neuroforma* oraz *SeeMe*).

Do przeprowadzenia programu usprawniania wspomaganego przez nowoczesne technologie informatyczne nieodzowne jest użycie dodatkowego oprzyrządowania. W jego skład może wchodzić np. komputer czy tablet oraz kolekcja różnego rodzaju sensorów, które przekazują informacje o aktualnym położeniu poszczególnych części lub całego ciała użytkownika w fizycznej przestrzeni w czasie rzeczywistym. W omawianych programach funkcję tę spełnia zwykła kamera internetowa lub kontroler Microsoft Kinect. W obu przypadkach to użytkownik jest odpowiedzialny za umiejscowienie swojego ciała w polu widzenia urządzenia, a ćwiczenia mogą być wykonywane jedynie w pozycji siedzącej (większe bezpieczeństwo pacjenta) lub stojącej (aktywacja mięśni kończyn dolnych) (Ryc. 3, Ryc. 4).

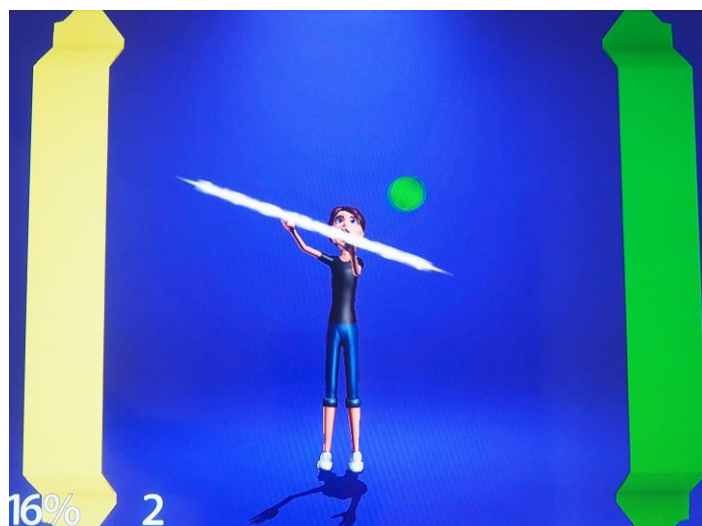


Rycina 3. Zadanie „Boks” – uderzanie w wirtualne worki treningowe (uderzanie w białe „celowniki”, unikanie czarnych), ruch kończyny górnej, z przecięciem linii środkowej ciała, może być wykonywany także w pozycji stojącej (system *Neuroforma*).

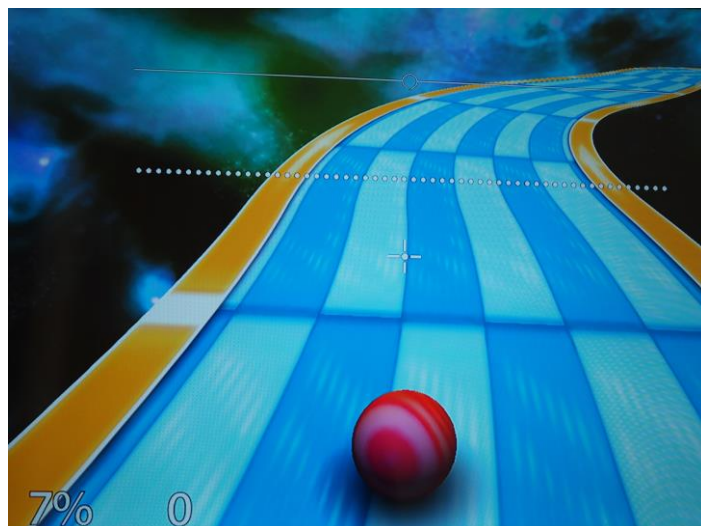


Rycina 4. Zadanie „Oarsman” – postać awatara widziana z przodu odwzorowuje ruchy pacjenta, prędkość poruszania się kajaka zależy od szybkości ruchów (wiosłowania) użytkownika (system *SeeMe*).

Pacjent znajduje się przed ekranem, na którym widzi swój obraz w odbiciu lustrzanym (Ryc. 3) lub model postaci 3D (awatar) umiejscowiony w stworzonym komputerowo, fikcyjnym otoczeniu (Ryc. 4, Ryc. 5). Postać awatara może być widziana z tyłu, tak jak w typowym dla tzw. perspektywy trzeciej osoby widoku lub w odbiciu lustrzanym (Ryc. 5). Użytkownik może się także utożsamiać z wirtualnym przedmiotem widocznym na monitorze i wprawiać go w ruch (Ryc. 6).



Rycina 5. Zadanie „Sorter” – sortowanie piłek ze względu na ich kolor, naprzemienne ruchy kończyn górnych, postać awatara widziana z przodu odwzorowuje ruchy użytkownika (system *SeeMe*).



Rycina 6. Zadanie „Slide” – pacjent utożsamia się z wirtualną kulą i steruje nią za pomocą ruchów tułowia w płaszczyźnie strzałkowej (start i zatrzymanie) i czołowej (przesuwanie kuli na boki) (system *SeeMe*).

Zgodnie z otrzymanym zadaniem pacjent wykonuje czynne, celowe, złożone wzorce motoryczne w określonej płaszczyźnie i kierunku, podobne do tych stosowanych podczas tradycyjnej kinezyterapii lub codziennych aktywności. Zadanie wiąże się z interakcją (tj. „dotykaniem” lub „sterowaniem”) z elementami przestrzeni wirtualnej. Ćwiczący stara się usuwać, odbijać, chwycić czy też podążać za obiektami na ekranie (Ryc. 7).



Rycina 7. Zadanie „Raft” – „zbieranie” ryb i unikanie zderzenia z beczkami, pacjent steruje wirtualną tratwą widoczną na ekranie za pomocą ruchów tułowia (głównie w płaszczyźnie czołowej), lustrzane odbicie postaci użytkownika (system *SeeMe*).

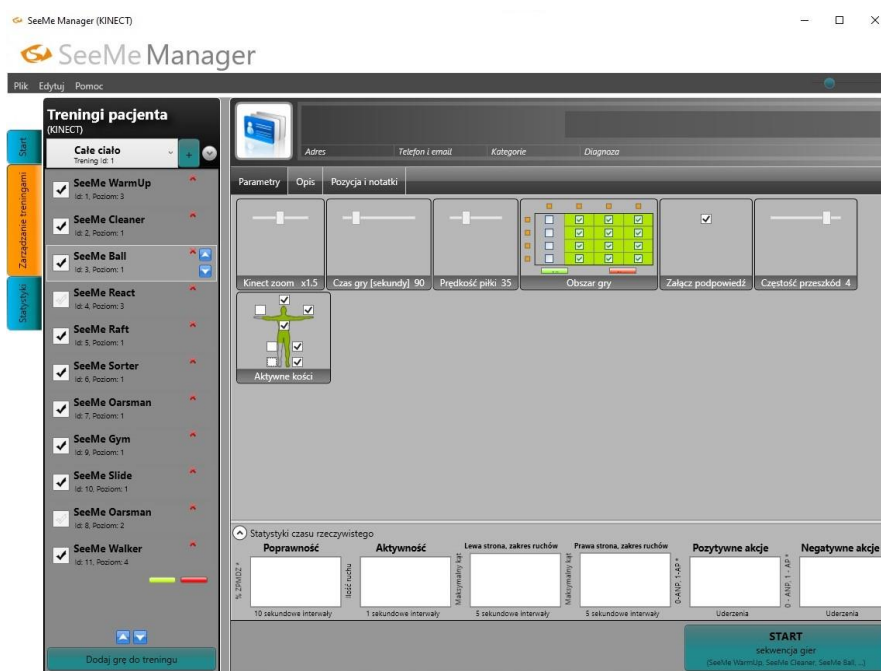
Generowany komputerowo, nierealny, a także „wzbogacony” obraz podnosi atrakcyjność ćwiczeń. W połączeniu z tzw. gamifikacją/grywalizacją (Zichermann i Cunningham, 2011), tj. zabawową formą przedstawiania i wykonywania zadań, system zwiększa motywację i aktywne zaangażowanie chorego w proces usprawniania, co może skutkować wydłużeniem czasu treningu (Brunner i in., 2016).

Ciekawa forma ćwiczeń i dodatkowe przypomnienia, np. komunikaty wysyłane automatycznie przez system i/lub pochodzące od terapeuty nadzorującego ćwiczenia, sprzyjają systematyczności (*Neuroforma*). Możliwość skorzystania z gotowych rozwiązań, tj. dostępnej bazy ćwiczeń, z których układa sesję rehabilitacyjną, znacznie ułatwia przygotowywanie indywidualnego programu terapii.

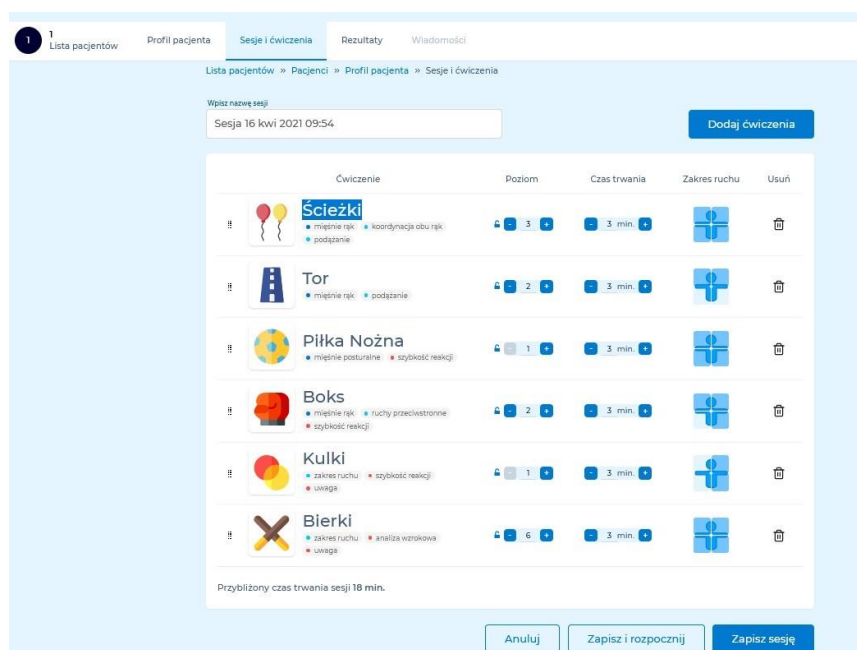
Ważnym i korzystnym elementem takich ćwiczeń jest wzmocnienie informacji zwrotnej dotyczącej wykonywanego ruchu za pomocą bodźca wizualnego i akustycznego (biofeedback). Ruch może być prowadzony po wyświetlanych ścieżkach/obszarach i/lub do wyznaczonych punktów/wirtualnych przedmiotów (Ryc. 2, Ryc. 7). Zakończenie danego etapu zadania sygnalizowane jest na ekranie np. poprzez zmianę koloru lub sygnał dźwiękowy. Zwrotna informacja czuciowa umożliwia aktywację mięśni oraz bieżące korygowanie błędów. Do ćwiczeń dołączone są krótkie filmy instruktażowe (*Neuroforma*), które ułatwiają zrozumienie polecenia i poprawne wykonanie zadania.

W podstawowej wersji obu systemów znajdują się głównie ćwiczenia związane z odbudową funkcji kończyny górnej i funkcji poznawczych (Ryc. 2) (*Neuroforma* jest dostępna z większą liczbą wbudowanych ćwiczeń). Wykonywane są ruchy unilateralne (jednostronne), zarówno bez konieczności przekroczenia linii środkowej ciała, jak i z nią, a także bilateralne (obustronne) – jednocześnie lub naprzemienne.

Zaletą obu omawianych systemów jest indywidualne dopasowanie sesji treningowej do potrzeb i możliwości pacjenta. Modyfikacji mogą podlegać rodzaj zadań ruchowych, ich czas trwania, liczba powtórzeń, poziom trudności czy też zakres wykonywanego ruchu (w *Neuroformie* obraz jest podzielony na cztery części, a w systemie *SeeMe* na 16 obszarów gry lub 8 części ciała, z możliwością wyboru preferowanego obszaru) (Ryc. 8, Ryc. 9). Poziom trudności ćwiczeń zmienia się także automatycznie po uzyskaniu określonego wyniku.



Rycina 8. Widok pulpitu fizjoterapeuty – tworzenie indywidualnej sesji treningowej dla pacjenta z możliwością wyboru szczegółowych parametrów zadania, m.in. czasu, częstości przeszkód i prędkości piłki oraz preferowanego obszaru ruchów (system SeeMe).



Rycina 9. Widok pulpitu fizjoterapeuty – tworzenie indywidualnej sesji treningowej dla pacjenta z możliwością wyboru szczegółowych parametrów zadania: czasu trwania, poziomu oraz preferowanego obszaru (w kolumnie „Zakres ruchu”) (system Neuroforma).

Analizowane systemy ćwiczeń nie dają pełnej możliwości wykonywania niektórych ruchów kończyn i tułowia, szczególnie w pełnym fizjologicznym zakresie. Ograniczenie dotyczy także ruchów selektywnych oraz przyjmowania dowolnej pozycji. Mimo że w omawianych programach najwięcej jest zadań dla kończyn górnych, to brakuje np. interaktywnych ćwiczeń precyzyjnych ruchów rąk i palców.

Częściowym rozwiązaniem, wspierającym poprawność wykonania ćwiczenia, jest opcja nagrywania i przesyłania krótkich relacji z sesji (w postaci nagrań wideo) do nadzorującego proces

usprawniania fizjoterapeuty (*Neuroforma*). Platforma umożliwia także nagrywanie i przesyłanie pacjentowi dodatkowych filmów z autorskimi ćwiczeniami.

Korzystanie z systemu *Neuroforma* jest możliwe w trybie on-line. Ma to zarówno pozytywne znaczenie (możliwość korzystania z systemu w dowolnym miejscu, np. w domu lub gabinecie fizjoterapii, oraz zdalnego monitorowania i modyfikowania ćwiczeń), jak i negatywne konsekwencje (konieczność dostępu do stabilnego łącza internetowego) (Ryc. 10).



Rycina 10. Zadanie „Motyl” pacjent podąża za ruchem motyla, ćwiczenie (jednostronne) kończyny górnej, tryb telerehabilitacji (on-line) – zastosowanie możliwe w dowolnym miejscu, interakcja za pomocą kamery internetowej (system *Neuroforma*).

3.2. Korzyści i ograniczenia cyfrowej rehabilitacji oraz czynniki, które mogą wpłynąć na efektywność procesu usprawniania

Ćwiczenia z użyciem tzw. wirtualnych środowisk (np. VR/AR) uważane są za nowatorską i obiecującą dodatkową formę usprawniania, która może zwiększyć skuteczność programów rehabilitacji zarówno pacjentów z deficytami sensomotorycznymi, jak i poznawczo-behawioralnymi (Massetti i in., 2018). Warto zatem podjąć próbę identyfikacji istotnych w procesie reedukacji czynników, które mogą powodować osiągnięcie tych pozytywnych efektów. Do najczęściej wymienianych należą: duża intensywność indukowana przez zadaniowy (celowy) i motywujący charakter ćwiczeń oraz wzmocnienie informacji zwrotnej (biofeedback) realizowane w czasie rzeczywistym (Brunner i in., 2014; Brunner i in., 2016; Fitzgerald i in., 2004; Holden i in., 2005; Krichevets i in., 1995; Merians i in., 2002). Uważa się, że zwiększenie skuteczności rehabilitacji opartej o cyfrowe technologie, związane ze wzrostem zaangażowania pacjenta, może być osiągnięte także dzięki zastosowaniu elementów grywalizacji (Jang i in., 2005).

Zależność efektu różnych form usprawniania od dawki ćwiczeń (ruchu) została zaobserwowana w wielu badaniach z zakresu rehabilitacji. Większa liczba powtórzeń oraz dłuższy czas trwania terapii wiążą się często z lepszym efektem funkcjonalnym (Kwakkel i in., 2002; Kwakkel i in., 2004; Kwakkel i in., 2006; Langhorne i in., 1996). Odpowiednio duża intensywność treningu uważana jest za jeden z podstawowych elementów pozytywnie wpływających na proces reedukacji, nie tylko w rzeczywistych, ale również w wirtualnych kontekstach (środowiskach) (Brunner i in., 2016). Niektóre badania sugerują ponadto, że u chorych po udarze mózgu intensywność ćwiczeń może mieć większy wpływ na poprawę funkcji kończyny górnej niż rodzaj wykonywanej aktywności (Saposnik i in., 2016).

Efekt uczenia się ruchu jest często analizowany w aspekcie trzech elementów (etapów): nabywania (ang. *acquisition*), utrzymania (ang. *retention*) danej umiejętności oraz jej przeniesienia (ang. *transfer*) (Muratori i in., 2013). Pierwszy etap wiąże się z nauką nowego ruchu i procesem jego doskonalenia (np. zwiększania jakości ruchu). W drugim ocenia się zdolność do ponownego

wykonania ruchu lub jego korekty po krótszym lub dłuższym czasie niewykonywania zadania. Wśród autorów nie ma pełnej zgodności, która ze strategii nauki motorycznej jest bardziej skuteczna – czy ta oparta na wielokrotnym wykonaniu (zblokowanego) ruchu, tzw. praktyka masowa (ang. *mass practice*), czy też „rozproszona” (ang. *distributed practice*), gdzie planuje się odpowiednie przerwy. Uważa się, że obie techniki należy wziąć pod uwagę przy planowaniu interwencji terapeutycznej i dobierać je indywidualnie w zależności od etapu procesu reedukacji i możliwości danego pacjenta (Muratori i in., 2013). Kolejną potencjalną modyfikacją jest zwiększenie tzw. efektu interferencji kontekstowej, czyli np. wprowadzenie zadań w przypadkowej kolejności (np. losowe sięganie i chwytanie różnych przedmiotów). Takie podejście może korzystnie wpłynąć na proces uczenia się danej sekwencji ruchu (Wright i in., 2016). Zmiana metodyki ćwiczeń ze strategii opartych na wielokrotnym powtarzaniu tych samych ruchów w jednej płaszczyźnie i podobnym kontekście na formę zadaniową w zmiennych płaszczyznach i warunkach może pozytywnie wpłynąć na skuteczność fizjoterapii (Stasieńko i Sarzyńska-Długosz, 2016). Zróżnicowanie poszczególnych ćwiczeń może ułatwić zarówno nabywanie nowych umiejętności motorycznych, jak i wykonywanie innych podobnych zadań oraz zwiększyć szansę skutecznego przeniesienia zdobytych umiejętności do rzeczywistych sytuacji, np. codziennych aktywności (Krakauer, 2006). Oba opisywane systemy wirtualnej rehabilitacji umożliwiają zastosowanie omawianych modyfikacji, które są istotne dla kontroli i nauczania motorycznego.

Skuteczny transfer umiejętności ruchowych nabytych w wygenerowanych komputerowo środowiskach zaobserwowano w doświadczeniach z udziałem zdrowych osób. Rose i in. (1997) dokonali porównania dwóch zadań sensomotorycznych: realnego i przeprowadzonego w symulacji komputerowej. Pierwsza (realna) wersja zadania polegała na prowadzeniu trzymanej w ręku drucianej pętli wzdłuż innego przewodu tak, aby go nie dotknąć. Kontakt pętli z przewodem odnotowywany był jako błąd. Druga grupa ćwiczyła ten ruch przy użyciu odpowiedniego systemu komputerowego. Grupa kontrolna otrzymała w tym samym czasie inne zadanie ruchowe, które nie było związane z badaną umiejętnością. Analiza wyników końcowego testu stabilności wykazała istotne różnice jedynie pomiędzy grupą kontrolną a pozostałymi dwiema grupami. Tak więc można stwierdzić, iż uczestnicy badania skorzystali w takim samym stopniu zarówno z praktyki rzeczywistej, jak i wirtualnej. Trening w wirtualnym środowisku jest obecnie powszechnie stosowanym narzędziem do doskonalenia trudnych elementów ruchowych i zadań wymagających precyzji u osób zdrowych w sporcie (Todorov i in., 1997) i wielu innych obszarach. Zjawisko przeniesienia nabytych w wirtualnych warunkach umiejętności wykorzystuje się np. w szkoleniach adresowanych do chirurgów (Lehmann i in., 2005). Zdolność wykonania ruchu w różnych warunkach i kontekstach określana jest jako elastyczność lub przenaszalność (ang. *flexibility, transferability*). Proces ten wymaga uwzględnienia różnych tzw. regulacyjnych i nieregulacyjnych właściwości środowiska, w którym wykonuje się daną aktywność (Muratori i in., 2013). Pierwsze z nich to takie, które powinno się wziąć pod uwagę w procesie wykonywania zadania (np. wysokość półki, na którą odkładamy książkę). Druga grupa to wszystkie czynniki poboczne, które nie stanowią integralnej części danego ćwiczenia, ale mogą wpłynąć na skuteczne wykonanie czynności. Należą do niej także bodźce rozpraszające (np. głos zbliżającej się osoby). Omawiane technologie komputerowe mają ogromny potencjał nieograniczonej symulacji różnorodnych sytuacji, dobranych indywidualnie zarówno do celu interwencji, jak i możliwości danego pacjenta.

Pojawia się pytanie, czy zasady związane ze skutecznym nabywaniem lub doskonaleniem zdolności motorycznych w wirtualnym treningu, które zidentyfikowano w badaniach obejmujących zdrowe osoby, można bezpośrednio przenieść do procesu reedukacji (ponownego uczenia się) pacjentów z uszkodzeniem mózgu. Jakie należy zastosować modyfikacje, aby zoptymalizować proces fizjoterapii? Zaobserwowano na przykład, że chorzy po UM, aby zwiększyć precyzję i prędkości ruchu sięgania, muszą wykonać znacznie więcej powtórzeń zadanego ćwiczenia w porównaniu ze zdrowymi uczestnikami badania (Cirstea i in., 2003).

Kolejnym obszarem badań nad skutecznością strategii opartych na cyfrowych technologiach w reedukacji pacjentów z różnymi problemami klinicznymi jest potwierdzenie, że umiejętności nabyte w wirtualnym środowisku mogą być przeniesione na inne zadania (tzw. uogólnienie) oraz do rzeczywistych sytuacji. W sztucznym, wygenerowanym komputerowo otoczeniu ćwiczący

pacjenci w mniejszym lub większym stopniu „udają”, że wykonują określone zadanie. Odbywa się to bowiem w abstrakcyjnym, wirtualnym kontekście i z użyciem niematerialnych przedmiotów (tj. wirtualnych modeli 3D), co skutkuje inną informacją zwrotną z receptorów i inną czasoprzestrzenną organizacją danego wzorca w porównaniu ze środowiskiem naturalnym. Jeśli takie wydajne przeniesienie byłoby możliwe, to cały proces reedukacji mógłby być przeprowadzany we względnie bezpiecznym, bo kontrolowanym przez program komputerowy środowisku treningowym i przyjemnej dla pacjenta formie. Poza korzyściami wynikającymi z zastosowania tej formy terapii należy wziąć pod uwagę pewne ograniczenia dotyczące szczególnie osób starszych, które mogą wykazywać niski stopień akceptacji nowoczesnych technologii (Serino i in., 2017), oraz pacjentów z zaburzeniami poznawczymi (Arns i Cerney, 2005). Podczas prowadzenia terapii w formie zdalnej powinno się zadbać o modyfikację programu ćwiczeń z uwagi na mniejszą kontrolę i brak asekuracji przez terapeutę.

Prowadzone badania pokazują, że taki transfer może być utrudniony m.in. u seniorów (Bezerra i in., 2018) oraz dorosłych pacjentów z mózgowym porażeniem dziecięcym (MPD) (de Mello Monteiro i in., 2014). Pojawiły się sugestie, że urealnienie zadania ruchowego (np. poprzez dotykowy panel lub precyzyjne odwzorowanie prawdziwego otoczenia) może korzystnie wpłynąć na ten proces (Adamovich i in., 2009; de Mello Monteiro i in., 2014). Różne paradygmaty przyczyniają się do tworzenia nowych umiejętności motorycznych oraz zdolności do ich utrzymania przez określony czas po zakończeniu praktyki i wykorzystania w codziennych aktywnościach oraz innych obszarach funkcjonowania. Wyniki takich badań potwierdzają konieczność indywidualnej modyfikacji programów reedukacji dostosowanych do indywidualnych możliwości poszczególnych pacjentów. Warto doprecyzować szczegółowe warunki takiego treningu, aby zoptymalizować skuteczne przeniesienie zdobytej umiejętności do podobnego zadania w realnym świecie. Zarówno identyfikacja takich czynników, jak i ciągły postęp technologiczny skutkują wprowadzaniem nowych rozwiązań. Stworzenie w oparciu o tę wiedzę systemu porównywalnego czy wręcz skuteczniejszego od standardowych rozwiązań przyniosłoby nowe perspektywy do dalszego rozwoju cyfrowej rehabilitacji.

Zaobserwowano również, że systemy komputerowe oparte o wzbogacone środowiska wirtualne umożliwiają stopniowanie trudności i zróżnicowanie poszczególnych zadań, co pozwala na lepsze wykorzystanie strategii uczenia motorycznego (Keshner i Fung, 2017; Levin i in., 2015). Brunner i in. (2016) uważają, że tego typu trening zawiera dużo więcej zadań zorientowanych na funkcję niż terapia konwencjonalna. Sugeruje się nawet, że te nowe, generowane komputerowo technologie mają przewagę nad konwencjonalnym modelem usprawniania, jeśli chodzi o implementację zasad nauczania motorycznego (Cano Porras i in., 2018).

Kolejną ważną strategią, służącą optymalizacji procesu (ponownego) uczenia się motorycznego, wprowadzoną w wirtualnej rehabilitacji jest wzmocniona, multisensoryczna informacja zwrotna (feedback), która umożliwia interakcję użytkownika z systemem komputerowym. Feedback ten przyjmuje postać zbioru różnych informacji, które docierają do pacjenta w związku z wykonaniem danego ruchu. Uważa się, że dostarczanie przez takie programy, oparte na cyfrowych technologiach, zwiększonej dawki informacji pozytywnie wpływa na skuteczność takich interwencji (Molier i in., 2010).

Dla prawidłowej kontroli zadań motorycznych, oceny efektów pobudzenia mięśni oraz korygowania błędów niezbędna jest informacja czuciowa pochodząca z narządu wzroku, ekstero- i proprioceptorów oraz narządu równowagi. Dane o pozycji i przebiegu ruchu poszczególnych części i całego ciała w przestrzeni odgrywają podstawową rolę w tworzeniu i modyfikowaniu odpowiedniego programu ruchowego (Kistemaker i in., 2013). Wydaje się, że uczymy się zarówno z obserwacji popełnianego błędu, jak i z procesu jego korygowania (Shadmehr, 2018).

W powyższym kontekście system wirtualnej rehabilitacji umożliwia dostarczanie informacji zwrotnej najczęściej za pomocą bodźców wzrokowych lub słuchowych w czasie rzeczywistym, która to informacja jest opisywana jako bardziej intensywna i selektywna niż gdy pochodzi z rzeczywistych zadań (Keshner i Fung, 2017; Levin i in., 2015).

Wydaje się, że najprostszym sposobem dodatkowej, bazującej na bodźcach wzrokowych kontroli wykonywanych ruchów pacjenta jest wygenerowanie lustrzanego odbicia użytkownika (Ryc. 1–3, 7, 10, 11.).



Rycina 11. Zadanie „Orzechy” – zbieranie orzechów i unikanie kasztanów, jednostronne ruchy kończyny górnej, lustrzane odbicie postaci użytkownika (system *Neuroforma*).

W terapii osób z zaburzeniami chodu i równowagi wykorzystuje się także graficzne (wizualne) lub dźwiękowe przedstawienie wyników pomiarów parametrów, takich jak np. reakcja sił podłoża na zmianę obciążenia stóp (wychylenia) ćwiczącego. Urządzenia z tzw. interfejsem dotykowym, od specjalnych rękawic po zaawansowane egzoszkielety, zapewniają pacjentom dodatkowe bodźce dotykowe. Pozwalają one pacjentowi poczuć różnorodność tekstur, a także ich modyfikacje. Istnieje coraz więcej doniesień potwierdzających, że informacja z ekstero- i proprioceptorów jest cennym elementem terapii w aspekcie zwiększenia ruchomości i siły mięśniowej (Jack i in., 2001). Taka forma oddziaływania wiąże się najczęściej z użyciem specjalnych rękawic umożliwiających stosowanie dodatkowego oporu (Xiaochi i in., 2016). Feedback pochodzący ze zmysłu dotyku został również zidentyfikowany jako istotny czynnik zwiększający efektywność wykonywania zadań ruchowych o wyższym stopniu trudności (Shing i in., 2003). Kokkinara i Slater (2014) w badaniach z użyciem VR zaobserwowali natomiast, że równoczesna stymulacja wzrokowo-motoryczna oddziałuje na iluzję posiadania ciała w większym stopniu niż wzrokowo-dotykowa. Silniejsze poczucie tzw. ucieleśnienia (ang. *embodiment*) i większą precyzję wykonywanego ruchu uzyskuje się u użytkownika obserwującego otoczenie z perspektywy pierwszoosobowej (ang. *first-person perspective*, FPP). Natomiast perspektywa trzeciej osoby (ang. *third-person perspective*, TPP) (Ryc. 1–3, 5, 7, 10, 11,) najprawdopodobniej umożliwia lepszą orientację przestrzenną (percepcję wzrokowo-przestrzenną) (Gorisse i in., 2017). Ocena wpływu rodzaju, czasu trwania, częstotliwości dodatkowego sprzężenia zwrotnego na skuteczność różnych form cyfrowej rehabilitacji jest przedmiotem wielu badań (Molier i in., 2010).

Analiza piśmiennictwa przynosi także liczne wyniki promujące połączenie wzbogaconego, wirtualnego środowiska treningowego z elementami specyficznymi dla gier (Burke i in., 2009; Fitzgerald i in., 2004; Karamians i in., 2020; Kato i in., 2008; Krichevets i in., 1995; Mihelj i in., 2012). Zastosowanie typowych zasad grywalizacji (np. użycie punktacji i oceny wykonania zadania, rywalizacja z innymi) wpływa na zwiększenie motywacji do ćwiczeń w porównaniu ze standardowym postępowaniem (Jang i in., 2005). Obserwowany wzrost zaangażowania pacjenta przekłada się m.in. na zwiększenie liczby powtórzeń ćwiczenia (Burke i in., 2009; Merians i in., 2002; Mihelj i in., 2012). Taka forma może przyczynić się także do lepszego przestrzegania zaleceń przez chorego, wspomóc powrót do zdrowia i korzystnie wpłynąć na zwiększenie poziomu jego wiedzy w różnych aspektach (Kato i in., 2008). Analiza wyników interwencji cyfrowych związanych z grywalizacją

stosowanych dla poprawy funkcji kończyny górnej po udarze wykazała, że korzyści z zastosowanej terapii były większe, gdy trening oprócz wizualnej informacji zwrotnej obejmował elementy gry (Karamians i in., 2020).

Rehabilitacja wspomagana przez nowoczesne technologie informatyczne jest najczęściej kompleksowa, oddziałuje zarówno na funkcje ruchowe, jak i poznawczo-behawioralne (Aminov i in., 2018; Lei i in., 2019; Massetti i in., 2016; Massetti i in., 2018). Ten korzystny efekt może wiązać się z wzajemnym oddziaływaniem treningu ruchowego i poznawczego na funkcje motoryczne i poznawcze. Dodatkowo systemy komputerowe wykorzystywane w procesie usprawniania (m.in. *Neuroforma* i *SeeMe*) umożliwiają zaplanowanie treningu opartego o tzw. paradygmat podwójnego zadania, w którym jednocześnie oddziałuje się na omawiane funkcje. Tego typu interwencje prowadzone są m.in. w grupie seniorów (Kruszyński i in., 2015). Zaobserwowano, że może to przynosić większe korzyści w porównaniu z programami jednozadaniowymi (Zhu i in., 2016).

Rehabilitacja oparta na systemach komputerowych ułatwia analizę i dokumentowanie efektów ćwiczeń. Obiektywna i porównywalna ocena stanu pacjenta oraz skuteczności terapii pozwalająca na indywidualną modyfikację celów i środków terapeutycznych to istotny element całego procesu (Błażejewska-Hyżorek i in., 2019).

System wirtualnej rehabilitacji może być stosowany jako interwencja wspomagająca standardowe podejścia przy mniejszym bezpośrednim zaangażowaniu terapeuty (Kim i in., 2018). Wiąże się to ze zredukowaniem obciążenia personelu niezbędnego do długotrwałego i żmudnego procesu reedukacji opartego na konwencjonalnych rozwiązaniach. Zwiększa to także przydatność takich form terapii do zdalnych zastosowań, ułatwiających kontynuowanie usprawniania np. w domu pacjenta (Holden i in., 2007). Zdalna forma terapii tj. bez osobistej kontroli fizjoterapeuty, może wiązać się jednakże z obawą o bezpieczeństwo ćwiczącego pacjenta, choćby z uwagi na możliwość upadku lub niechcianego kontaktu z przypadkowymi przedmiotami znajdującymi się w rzeczywistym otoczeniu użytkownika takiego systemu.

Wprowadzenie tego typu terapii uważa się za ekonomicznie uzasadnione (Burdea, 2003; Gandolfi i in., 2017). Wskazywane ograniczenie dostępności do cyfrowej rehabilitacji może wynikać z konieczności dodatkowego przeszkolenia personelu, pacjenta oraz poniesienia kosztów wynikających z zakupu wysokiej klasy sprzętu elektronicznego, a także dostępu do oprogramowania czy też sieci bezprzewodowej (Burdea, 2003). Obecnie oferowane rozwiązania umożliwiają użycie standardowego sprzętu, co korzystnie wpływa na wycenę takiego rozwiązania.

Długotrwałe przebywanie przed monitorem może mieć także niekorzystne następstwa, np. obciążenie narządu wzroku, co z kolei może wywoływać u pacjenta uczucie zmęczenia (Toomingas i in., 2014). Podczas sesji należy pamiętać o robieniu przerw, korekcji i zmianach pozycji, np. z siedzącej na stojącą, gdyż długotrwałe ćwiczenia w wymuszonych pozycjach mogą prowadzić do przeciążenia niektórych struktur układu ruchu (Waongenngarm i in., 2018).

Interakcja z systemem komputerowym wymaga od pacjenta zdolności koncentracji i uważnej obserwacji zmieniającego się obrazu czego konsekwencją może być ograniczona dostępność takich form terapii dla chorych z dużymi deficytami poznawczymi lub upośledzonym narządem wzroku. To z kolei stanowi częste kryterium wyłączenia z udziału w takich programach (Laver i in., 2017). W opinii innych badaczy korzyści z tej formy usprawniania odnoszą jedynie pacjenci we względnie dobrym stanie ogólnym (Türkbey i in., 2017).

Oba omawiane systemy (*Neuroforma*, *SeeMe*) nie zapewniają satysfakcjonujących rozwiązań promujących jakość ruchu. Program *Neuroforma* wysyła jedynie informacje dotyczące nadmiernego wychylenia tułowia w trakcie ćwiczeń. Uzyskanie dobrego wyniku i zaliczenie zadania nie wiąże się z oceną poprawności jego wykonywania. Ćwiczenia mogą być realizowane przy użyciu nieprawidłowych, kompensacyjnych wzorców motorycznych. Wielokrotne powtarzanie takich zaburzonych wzorców może skutkować ich utrwaleniem. Dostępna w systemie *Neuroformy* opcja nagrywania i przesyłania krótkich relacji z ćwiczeń w postaci nagrań wideo kryje w sobie duży potencjał do wykorzystania w omawianym zakresie, może bowiem posłużyć do analizy jakości ruchu.

Dodatkowo zadania dla kończyn górnych mogą być tu realizowane jedynie w tzw. otwartym łańcuchu kinematycznym, w którym ostatnie ogniwo jest wolne. Pacjenci z ograniczoną kontrolą motoryczną i małą siłą mięśniową są narażeni na zwiększone ryzyko tworzenia nieprawidłowych

wzorców ruchowych i zaburzonej dystrybucji napięcia mięśniowego. U chorych z dużymi deficytami, którzy dopiero rozpoczynają proces reedukacji, należy dokonać analizy stosunku korzyści do ewentualnych niepożądanych skutków tej formy terapii.

Użycie cyfrowych technologii, a zwłaszcza immersyjnego środowiska, może powodować niepożądane objawy tzw. choroby symulatorowej (ang. *cybersickness*), do których zaliczają się: zmęczenie, senność, dezorientacja, zawroty i bóle głowy, a nawet nudności i wymioty. Efekt ten wydaje się być zależny od wielu czynników, np. stopnia „zanurzenia” w wirtualnym środowisku czy różnic pomiędzy światem rzeczywistym a wirtualnym odbieranym przez zmysły użytkownika. Innymi czynnikami mogącymi wpłynąć na wystąpienie objawów choroby symulatorowej mogą być również rodzaj wykorzystanego urządzenia, indywidualne predyspozycje ćwiczącego, a także rodzaj zadania wykonywanego przy użyciu interfejsu immersyjnego (Hughes i in., 2020). Objawy te najczęściej obserwuje się w systemach VR, zaś stosunkowo rzadko występują one, gdy wykorzystana jest AR (Vovk i in., 2018). Wyniki badań nie są jednoznacznie, ale niektóre z nich wskazują na większe ryzyko pojawienia się objawów choroby u osób starszych (Arns i Cerney, 2005). Skutki wystąpienia takich objawów mogą okazać się bardziej niebezpieczne w populacjach o zwiększonej skłonności do zaburzeń równowagi oraz upadków, np. u seniorów (de Mello Monteiro i in., 2014). Należy także rozważyć korzyści i zagrożenia stosowania systemów pełnej immersji u najsłabszych pacjentów z zaburzeniami poznawczymi. W analizowanych badaniach częstotliwość występowania niepożądanych skutków stosowania cyfrowej rehabilitacji była mała, a symptomy te najczęściej miały łagodny przebieg (Laver i in., 2017).

Szczegółowy wykaz korzyści (zalet) i ograniczeń (wad) cyfrowych form rehabilitacji opartych na nowoczesnych technologiach informatycznych, takich jak: VR, AR lub MR przedstawiono w Tabeli 1. Zestawienie sporządzono w oparciu o przegląd literatury naukowej i doświadczenia własne.

Tabela 1. Szczegółowy wykaz potencjalnych korzyści (zalet) i ograniczeń (wad) rehabilitacji opartej na cyfrowych technologiach.

Korzyści/zalety	Ograniczenia/wady
zadaniowa forma	praca przy monitorze ekranowym
obraz wirtualny wzbogacony cyfrowo	ograniczone pozycje i ruchy
elementy grywalizacji	ograniczenie rodzaju ćwiczeń
motywacja do ćwiczeń	ograniczona informacja zwrotna dotycząca jakości wykonywanego ruchu
wydłużenie treningu	nieprawidłowe wzorce kompensacyjne
zwiększona intensywność treningu	ograniczona dostępność dla chorych z dużymi deficytami
systematyczność	ograniczony dostęp z uwagi na konieczność nauki obsługi systemu
indywidualizacja	ograniczony dostęp z uwagi na sprzęt
wybór preferowanego obszaru ruchu	konieczność korzystania z dodatkowego oprogramowania i łącza internetowego
kompleksowość	brak trybu offline (<i>Neuroforma</i>)
trening poznawczo-ruchowy (podwójne zadanie)	ograniczony kontakt z terapeutą

Tabela 1. Szczegółowy wykaz potencjalnych korzyści... (cd.)

powtarzalność	obawa o bezpieczeństwo pacjentów
dostępność	nudności, zawroty i bóle głowy, wymioty (choroba symulatorowa, immersyjne VR)
biofeedback	
baza ćwiczeń	
raportowanie	
zdalne monitorowanie	
efektywność kosztowa	
wersja on-line (Neuroforma)	

4. Skuteczność różnych form cyfrowej rehabilitacji w wybranych grupach pacjentów

Skuteczność ćwiczeń z wykorzystaniem systemów cyfrowej rehabilitacji zestawia się najczęściej w porównaniu z alternatywną interwencją, standardowym postępowaniem (konwencjonalną terapią) lub jej brakiem. W opracowaniach dokonuje się także próby porównania różnych typów ćwiczeń zaliczanych do tej kategorii (Chen i in., 2018; Corregidor-Sánchez i in., 2021; Lohse i in., 2014). Ocena efektów wirtualnej rehabilitacji dokonywana jest głównie w aspekcie motoryki i funkcji kończyny górnej, sprawności chodu i równowagi, a także funkcji poznawczych (Aminov i in., 2018; Chen i in., 2018; Corregidor-Sánchez i in., 2021; Laver i in., 2017; Lei i in., 2019; Lohse i in., 2014; Massetti i in., 2016; Miguel-Rubio i in., 2020). Skutki oddziaływania terapii analizowane są także na poziomach struktur/funkcji ciała, aktywności i uczestnictwa zgodnie z Międzynarodową Klasyfikacją Funkcjonowania, Niepełnosprawności i Zdrowia (ang. International Classification of Functioning, Disability and Health, ICF) (Aminov i in., 2018; Lohse i in., 2014). W związku z dynamicznym rozwojem metod wspartych technologiami cyfrowymi oraz dużą liczbą nowych doniesień naukowych (Aminov i in., 2018; Chen i in., 2018; Corregidor-Sánchez i in., 2021, Gumaa i Rehan Youssef, 2019; Laver i in., 2017; Lei i in., 2019; Lohse i in., 2014; Massetti i in., 2016; Massetti i in., 2018; Miguel-Rubio i in., 2020) dokonano przedstawienia wyników wybranych badań pochodzących głównie z ostatniej dekady. Prace naukowe na temat zastosowania nowoczesnych technologii dotyczą najczęściej neurorehabilitacji (Aminov i in., 2018; Chen i in., 2018; Laver i in., 2017; Lei i in., 2019; Lohse i in., 2014; Massetti i in., 2016; Miguel-Rubio i in., 2020). Wśród osób badanych znajdują się także dzieci (Chen i in., 2018). Najliczniej reprezentowaną grupą pacjentów z zaburzeniami neurologicznymi, u których z powodzeniem dokonuje się implementacji takich ćwiczeń, są chorzy po udarze mózgu (Aminov i in., 2018; Laver i in., 2017; Lohse i in., 2014). W ostatnim czasie przybywa działań wspierających wdrażanie cyfrowo wspomaganých form terapii w procesie usprawniania osób starszych (Corregidor-Sánchez i in., 2021). Tabela 2 zawiera przykłady zastosowania wirtualnej rehabilitacji w wybranych grupach pacjentów.

Tabela 2. Przykłady przeglądów systematycznych oceniających skuteczność programów tzw. wirtualnej rehabilitacji w wybranych grupach pacjentów.

Autor, rok	Badana grupa	Liczba badań (liczba uczestników)	Wnioski
Massetti i in., 2018	Pacjenci z zaburzeniami neurologicznymi (po udarze mózgu, z porażeniem mózgowym, urazami rdzenia kręgowego i inne)	37	Trening VR ma korzystny wpływ na wyniki rehabilitacji pacjentów z zaburzeniami neurologicznymi. Interwencje VR są związane z poprawą funkcji motorycznych, zwiększeniem uczestnictwa w życiu społecznym oraz poprawą funkcji psychicznych i poznawczych.
Aminov i in., 2018	Pacjenci po udarze mózgu	33 (971, w tym 492 VR)	U pacjentów po udarze mózgu zastosowanie interwencji VR w terapii może mieć przewagę nad terapią konwencjonalną w zakresie wpływu na składniki ICF: struktury i funkcje ciała oraz aktywności (efekt mały do średniego), ale nie na uczestnictwo. Wstępne wyniki sugerują wpływ interwencji VR na funkcje poznawcze (efekt mały do średniego).
Laver i in., 2017	Pacjenci po udarze mózgu	72 (2470)	Zastosowanie interwencji VR nie jest skuteczniejsze od konwencjonalnej terapii w aspekcie poprawy funkcji kończyny górnej u pacjentów po udarze mózgu. Terapia z VR może być korzystna w poprawie funkcji kończyn górnych i czynnościach codziennego życia, gdy jest stosowana jako dodatek do zwykłej opieki w celu wydłużenia całkowitego czasu terapii (dowody umiarkowanej jakości), ale nie są jasne skutki długoterminowe. Wyniki sugerują (zależność na poziomie tendencji do wystąpienia istotności statystycznej), że dłuższy czas terapii oraz spersonalizowane programy są skuteczniejsze. Nie odnotowano poważnych zdarzeń niepożądanych.
Miguel-Rubio i in., 2020	Pacjenci po urazie rdzenia kręgowego	12 (188)	Interwencje VR przynoszą dodatkowe korzyści dotyczące poprawy równowagi jako uzupełnienie konwencjonalnej fizjoterapii u pacjentów po urazie rdzenia kręgowego. Z uwagi na słabą jakość artykułów włączonych do analizy wyniki powinny być interpretowane z ostrożnością.

Tabela 2. Przykłady przeglądów systematycznych... (cd.)

Lei i in., 2019	Pacjenci z chorobą Parkinsona (PD)	16 (555)	Trening z VR jest skuteczniejszy w porównaniu z klasyczną formą uprawiania w aspekcie wpływu na: długość kroku, równowagę, jakość życia oraz objawy neuropsychiatryczne. Terapia w wirtualnych środowiskach ma podobny do standardowych rozwiązań wpływ na globalne funkcje motoryczne, czynności dnia codziennego oraz funkcje poznawcze. Wyniki powinno się traktować z ostrożnością. Potrzebne są dalsze badania. Trening VR – w porównaniu ze standardowym postępowaniem – wiązał się z większą poprawą w zakresie długości kroków. Nie zaobserwowano istotnych różnic między interwencjami VR a grupą kontrolną w zakresie parametrów, takich jak: szybkość chodu, równowaga, sprawność motoryczna i jakość życia. Warto rozważyć włączenie takich form terapii do rutynowego stosowania w rehabilitacji pacjentów z PD. Do ograniczeń tego badania można zaliczyć dużą różnorodność stosowanych interwencji oraz brak długoterminowych obserwacji. VR może być skuteczną metodą rehabilitacji dla pacjentów z SM z deficytami poznawczymi i motorycznymi.
Triegaardt i in., 2020	Pacjenci z chorobą Parkinsona	10 (343)	Interwencje VR stanowią motywacyjną alternatywę dla standardowych programów usprawniania pacjentów z SM. Potrzebne są dalsze badania dla poparcia tezy o skuteczności rehabilitacji z zastosowaniem VR i poprawy efektywności takiej terapii. Zastosowanie terapii z VR wpływa na poprawę funkcji kończyny górnej, mobilności i kontroli postawy u dzieci z MPD.
Masseti i in., 2016	Pacjenci ze stwardnieniem rozсіяnym (SM)	10	Systemy konstruowane przez inżynierów mogą przynosić lepsze efekty, jednak wykorzystanie aktualnie dostępnych na rynku systemów VR może być również dobrą alternatywą (zapewnia średni lub duży efekt).
Chen i in., 2018	Pacjenci z mózgowym porażeniem dziecięcym	19 (504)	

4.1. Cyfrowa rehabilitacji pacjentów po udarze mózgu

Udar mózgu jest jedną z głównych przyczyn zgonu oraz długotrwałej niesprawności osób dorosłych (Benjamin i in., 2018). Śmierć lub niezadowalający wynik leczenia (znaczną niesprawność lub konieczność opieki instytucjonalnej) po trzech miesiącach od UM dotyczy około 40% wszystkich chorych (Heuschmann i in., 2011). Co więcej, wyniki badania Dhamoon i in. (2009) wskazują na stopniowe pogarszanie się sprawności funkcjonalnej w perspektywie kolejnych pięciu lat. Wśród elementów związanych z gorszym rokowaniem chorych po udarze istotny okazał się ograniczony dostęp do opieki zdrowotnej, w tym rehabilitacji.

Podeszły wiek jest głównym niemodyfikowalnym czynnikiem ryzyka chorób sercowo-naczyniowych i negatywnym predyktorem dobrego wyniku funkcjonalnego (Knoflach i in., 2012). Biorąc pod uwagę zmianę struktury demograficznej społeczeństw (zwiększony udział osób starszych) (Gorelick, 2009) oraz lepsze możliwości leczenia fazy ostrej, bezwzględna liczba chorych z deficytami wywołanymi udarem będzie prawdopodobnie systematycznie rosnąć (GBD, 2019).

Kliniczne następstwa UM, które ograniczają zdolność wykonywania rozmaitych, nawet podstawowych aktywności w zakresie samoobsługi czy lokomocji, mogą wpłynąć na utrudnienie uczestnictwa w życiu społecznym i zawodowym oraz przyczyniać się do obniżenia jakości życia tej grupy pacjentów (Faria-Fortini i in., 2011; Min i Min, 2015). Konsekwencjami udaru mogą być niedowład lub porażenie oraz zaburzenie napięcia mięśniowego, upośledzenie czucia, widzenia, a także zaburzenie funkcji behawioralnych (poznawczych, wykonawczych oraz emocjonalno-afektywnych) (Błazejewska-Hyżorek i in., 2019). Deficyt motoryczny może dotyczyć nawet ponad 80% chorych w fazie ostrej, a czuciowy – około połowy przypadków (Bogousslavsky i in., 1988; Carey i Matyas, 2011). U pacjentów z niedowładem i współistniejącymi zaburzeniami czucia obserwuje się mniejszą sprawność w zakresie codziennych czynności w porównaniu z pacjentami z samą tylko dysfunkcją ruchową (Han i in., 2002). Do innych objawów ruchowych występujących u chorych zalicza się zaburzenia koordynacji i równowagi (Hacmon i in., 2012). Ataksja i inne zaburzenia jakości ruchu, które nie wynikają z obniżonej siły mięśni kończyn i tułowia, związane są najczęściej z uszkodzeniem mózdzku i jego połączeń. Zaburzenia równowagi i stabilności ciała wpływają na zmniejszenie możliwości lokomocji pacjenta oraz wzrost prawdopodobieństwa upadków (Thilarajah i in., 2018). Zwiększoną predyspozycję do upadków zaobserwowano także u pacjentów z niską sprawnością w zakresie codziennych czynności, z lewostronnym deficytem ruchowym, zespołem zaniedbywania oraz u chorych powyżej 65. roku życia (Czernuszenko i Członkowska, 2009).

Badania prowadzone na zwierzętach i ludziach pomagają zidentyfikować wiele kluczowych elementów związanych ze skutecznością odbudowy funkcji (Kleim i Jones, 2008). Wiedzę z tego obszaru warto przenieść do praktyki klinicznej w celu zwiększenia efektywności procesu odzyskiwania sprawności. Dzięki nowoczesnym technikom neuroobrazowania i stymulacji mózgu dokonano ogromnego postępu w zrozumieniu procesów strukturalnej i funkcjonalnej reorganizacji tego narządu na skutek działania wielu pozytywnych i negatywnych czynników (bodźców), takich jak trening czy uszkodzenie (Grefkes i Fink, 2020; Hatem i in., 2016; Hendricks i in., 2002). Wykazano, że poziom sprawności pacjentów po udarze jest determinowany zarówno przez spontaniczny proces zdrowienia, jak i ten zależny od doświadczenia zdobywanego w procesie uczenia się (Langhorne i in., 2011). Uważa się, że pozytywne efekty włączenia cyfrowych technologii mogą wiązać się z przeniesieniem do wirtualnej rehabilitacji istotnych w procesie reorganizacji mózgu zasad odnoszących się do nauczania motorycznego (Keshner i Fung, 2017; Levin i in., 2015). Plastyczność kompensacyjna (po uszkodzeniu mózgu) może być wzmacniana na skutek szeroko rozumianego treningu (Hamzei i in., 2020; Grau-Sanchez i in., 2020; Liepert i in., 2000; Liepert i in., 2004; Liepert, 2006). Korzystny efekt funkcjonalny po programie rehabilitacji w środowisku wirtualnym wydaje się wiązać z neuronalną reorganizacją mózgu, podobną do tej obserwowanej po usprawnianiu w rzeczywistym kontekście (Jang i in., 2005).

Proces reedukacji powinien być indywidualnie dostosowany do potencjału chorego. Możliwości pacjenta zależą nie tylko od aktualnych deficytów ruchowych i pozaruchowych, związanych z chorobą, ale także od reakcji organizmu na utratę sprawności lub zmniejszoną aktywność. W planowaniu usprawniania należy uwzględnić choroby współistniejące, tolerancję wysiłku, a także szereg dodatkowych czynników osobowych i środowiskowych, np. wsparcie otrzymane od najbliższych (Lexell i Brogårdh, 2015).

Oczekiwanym efektem takiego procesu jest stopniowe przechodzenie od ograniczonych, prostych lub globalnych wzorców do płynnych i precyzyjnych ruchów w możliwie pełnym zakresie i z prawidłowym napięciem mięśniowym. Odzyskiwanie kontroli motorycznej skutkuje lepszą wydajnością ruchu, który wykonywany jest bardziej ekonomicznie (Muratori i in., 2013). Należy zatem zachęcać chorego do stopniowego zwiększania zarówno ruchomości, jak i liczby powtórzeń przy równoczesnej prawidłowej kontroli ruchu i pozycji, ciała niezbędnych do pełnego odzyskania

sprawności – tzw. regeneracji motorycznej. Jeżeli nie uda się tego celu osiągnąć, warto poszukać zastępczych sposobów wykonania danej czynności, skutecznych i możliwie najbardziej zbliżonych do prawidłowych wzorców. Niewłaściwe strategie kompensacyjne mogą wpłynąć niekorzystnie na proces odbudowy funkcji (Roby-Brami i in., 2003). Najchętniej wybierany przez chorych i najłatwiejszy sposób realizowania codziennych aktywności polega na wykorzystywaniu sprawnych (zdrowych) elementów, np. drugiej ręki. Może to skutkować tzw. wtórnym nieużywaniem słabszej części ciała i przeciążeniem zdrowej strony. Realizowaną u pacjentów z obniżoną sprawnością kończyny górnej strategią umożliwiającą skuteczne wykonanie zadania związanego z sięganiem może być np. pochylenie tułowia w kierunku przedmiotu i/lub wykonanie ruchu w nieprawidłowym wzorcu kończyny i łopatki (Cirstea i Levin, 2000). Niepożądane, kompensacyjne ruchy tułowia mogą być mniejsze, gdy trening sięgania zostanie przeprowadzony w VR z użyciem montowanego na głowie wyświetlacza (Subramanian i Levin, 2011) oraz w wirtualnym środowisku z wykorzystaniem dodatkowej informacji zwrotnej (Subramanian i in., 2013). W doświadczeniu przeprowadzonym przez Subramanian i in. (2013) dokonano porównania efektów treningu motorycznego prowadzonego w dwóch grupach chorych po udarze, u których zastosowano różne formy usprawniania. Uczestnicy pierwszej grupy wykonywali ćwiczenia związane z dotykiem rzeczywistych celów (zawieszonych na drewnianej ramie), natomiast badani w drugiej grupie sięgali do przedmiotów znajdujących się na półkach wirtualnego sklepu (system CAREN). Co ważne, pacjenci obu grup otrzymywali informację zwrotną dotyczącą jakości ruchów kończyny górnej oraz ewentualnych kompensacyjnych ruchów tułowia. U wszystkich pacjentów uzyskano poprawę funkcji kończyny górnej, ale w grupie ćwiczącej w rzeczywistym otoczeniu zaobserwowano większe przemieszczanie się tułowia w trakcie sięgania do celu. Program usprawniania oparty na wirtualnym środowisku umożliwiał wykorzystanie dodatkowych efektów graficznych oraz wyświetlanie danych o wyniku zadania (elementy te mogły zwiększyć motywację i interakcję z wygenerowanym komputerowo obrazem, co potencjalnie wpływało na lepszy efekt treningu).

Jeśli chory po UM nie będzie odpowiednio stymulowany do podejmowania aktywności, to pomimo wzrostu potencjału motorycznego, związanego z procesami zdrowienia, częstość wykonywanych ruchów może się nie zwiększać. Problem ten nasila się u pacjentów z zaburzeniami poznawczymi. Związane z uszkodzeniem mózgu ograniczenie spontanicznego używania kończyn (przeciwległych do uszkodzonej półkuli mózgu, w tym częściej lewych) połączone z zaburzoną eksploracją przestrzeni obserwowane jest u chorych z zespołem zaniedbywania jednostronnego (Polanowska i Seniów, 2005). Świadome zmniejszenie posługiwania się silniejszą (sprawną) kończyną połączone z intensywnymi ćwiczeniami kończyny po stronie niedowładnej uważane jest przez wielu autorów za obiecującą formę rehabilitacji pacjentów po UM (Liepert, 2006; Sirtori i in., 2009). Oba wcześniej omawiane systemy komputerowe (*Neuroforma*, *SeeMe*) umożliwiają modyfikację polegającą na wyborze preferowanego obszaru ruchów kończyn i tułowia. Wymusza to zwiększoną częstotliwość lub zakres ruchu ćwiczonych części ciała kończyny i zwrócenie uwagi pacjenta na pomijany obszar (Ryc. 12, Ryc. 13). Takie rozwiązania dostępne są w wielu specjalistycznych systemach komputerowych, w których stosuje się wirtualne interfejsy. Mają one duży potencjał, wykorzystywane są zarówno w procesie diagnostycznym (Jannink i in., 2009), jak i w rehabilitacji pacjentów z zaburzeniami w zakresie uwagi przestrzennej (Ansuini i in., 2006; Katz i in., 2005).



Rycina 12. Zadanie „Ball” – odbijanie wirtualnych piłek, które lecą z różnych stron, można zaplanować obszar, z którego nadlatują piłki – zadanie dla kończyn górnych tułowia i głowy (system SeeMe).



Rycina 13. Zadanie „Gąbka” – czyszczenie okna wykonywane w pozycji siedzącej, obustronne, asymetryczne ruchy kończyn górnych, możliwość zaplanowania obszaru pojawiania się gąbek, które wymuszają aktywność (system Neuroforma).

Szczegółowa, obiektywna analiza aktywności ruchowej w środowiskach wirtualnych obejmująca osoby zdrowe i pacjentów z zaburzeniem motoryki jest przedmiotem badań (Wilson i in., 1996). W doświadczeniu Viau i in. (2004) porównano wzorce ruchowe dotyczące funkcji sięgania i chwytania z udziałem rzeczywistych przedmiotów oraz wirtualnych obiektów, prezentowane przez zdrowych ochotników i chorych po udarze. Do badania użyto specjalnej rękawicy z włókna

światłowodowego z mechanizmem sprzężenia zwrotnego siły chwytu. Aktualne ułożenie ręki odczytano za pomocą elektromagnetycznego detektora (ang. *tracker*), a ponadto rejestrowano parametry kinematyczne kończyny górnej i tułowia, gdy uczestnik eksperymentu osiągał już zamierzone cele rzeczywiste lub wirtualne. Analiza wyników pokazała niewielkie różnice danych związanych z opisem przestrzennej i czasowej charakterystyki ruchu pomiędzy zadaniem rzeczywistym i tym realizowanym przy użyciu środowiska wirtualnego u zdrowych osób. Dane te dotyczyły wyprostu stawów: nadgarstkowego i łokciowego oraz czasu maksymalnego otwarcia chwytu. Nie wykazano takich różnic u chorych po udarze wykonujących ruch kończyną po stronie niedowład. W innym badaniu skupiono się na analizie wyników testu funkcjonalnego sięgania w bok, wykonywanego w systemie IREX, gdzie obraz 3D wyświetlany był na płaskim ekranie i w rzeczywistym środowisku (Lott i in., 2003). Zadanie wykonane z zastosowaniem interfejsów immersyjnych umożliwiałoby obserwację efektów wykonywanego ruchu z perspektywy trzeciej osoby. Zarówno młodszy, jak i starsi uczestnicy badania osiągnęli znacznie lepsze wyniki, gdy zadanie było wykonywane przy użyciu aplikacji immersyjnej. Taka forma treningu mogła skutkować odwróceniem uwagi od konsekwencji utraty równowagi i lepsze skupienie się na aktywności.

Dla zwiększenia pozytywnego efektu opartej o cyfrowe technologie fizjoterapii stosuje się dodatkowo bodźce dotykowe (oprócz wzrokowych i słuchowych). Dla urealnienia treningu związanego z precyzyjnymi ruchami rąk i palców przeprowadzanego dla chorych z niedowładem przy pomocy wirtualnego trenera fortepianu użyto specjalnych, sterowanych komputerowo, rękawic/ortez (Adamovich i in., 2009). System ten, z wbudowanym symulatorem fortepianu, dostarczał użytkownikowi multisensorycznej (wizualnej, słuchowej i dotykowej) informacji zwrotnej.

Wirtualna rehabilitacja jest stosunkowo nową technologią, która nie jest rutynowo stosowana w praktyce klinicznej. Jednak z uwagi na jej potencjalne korzyści oraz ograniczenia standardowych systemów usprawniania (Veerbeek i in., 2014) obserwuje się rosnącą liczbę doniesień opisujących zastosowanie tych nowoczesnych form terapii u pacjentów po UM. Lohse i in. (2014) dokonali porównania różnych typów tzw. interwencji VR (VE – bez użycia robotów rehabilitacyjnych oraz CG) z grupami kontrolnymi obejmującymi zwykłą opiekę lub terapię konwencjonalną. Wyniki pracy sugerują, że trening w oparciu o VR ma umiarkowanie większy wpływ na składniki ICF – funkcje ciała i aktywność – niż konwencjonalna terapia. Zbyt mała liczba badań opartych na grach komercyjnych nie pozwoliła ocenić potencjalnych korzyści wynikające z takich interwencji. Nie wykazano także różnicy dotyczącej wpływu VE i gier komercyjnych na poprawę w zakresie składników ICF.

O korzyściach z zastosowania cyfrowej formy ćwiczeń w procesie odbudowy funkcji kończyny górnej donoszą także autorzy kolejnej pracy przeglądowej (Hatem i in., 2016). Jednak pomimo generalnie pozytywnych wyników zwraca uwagę niski lub umiarkowany poziom dowodów, który uniemożliwia ostateczną ocenę wartości poszczególnych interwencji (technik) w wirtualnych środowiskach. Uzasadniona jest zatem konieczność prowadzenia dalszych badań w tym obszarze.

Z kolei Laver i in. (2017) sugerują, że ćwiczenia w wirtualnych środowiskach przynoszą korzyści w zakresie funkcji motorycznych i wykonywania innych codziennych aktywności, ale nie są one skuteczniejsze od standardowej terapii. Taka forma usprawniania może być użyteczna w poprawie funkcji kończyny górnej i czynnościach codziennego życia (przede wszystkim w zakresie mycia się i ubierania), gdy jest stosowana jako dodatek do zwykłej opieki. Realizowane w omawianym badaniu przeglądowym interwencje były zróżnicowane i obejmowały zarówno spersonalizowane programy VR, jak i popularne gry konsolowe. Nie zgromadzono wystarczających dowodów potwierdzających lepszy wpływ wirtualnej rehabilitacji na szybkość chodu, równowagę, uczestnictwo w życiu społecznym oraz jakość życia. Jednakże zwrócono uwagę na pozytywny efekt wydłużenia czasu terapii (ponad 15 godzin całkowitej interwencji) i zastosowania spersonalizowanych systemów komputerowych (zależność na poziomie tendencji do wystąpienia istotności statystycznej). Nie odnotowano poważnych zdarzeń niepożądanych. Niewielka liczba uczestników badania zgłaszała bóle i zawroty głowy, co mogło się wiązać z zastosowaniem pełnych technologii immersyjnych w systemach VR.

Analizy wpływu cyfrowej rehabilitacji na sprawność kończyny górnej i funkcje poznawcze oraz porównania interwencji VR z terapią konwencjonalną dokonano także w kolejnej pracy przeglą-

dowej (Aminov i in., 2018). Wśród tzw. interwencji VR znalazły się zarówno spersonalizowane programy, jak i gry konsolowe, natomiast z przeglądu wyłączono programy hybrydowe łączące wirtualne środowisko ze stymulacją egzogenną lub robotyką. Skutki oddziaływania terapii zanalizowano na poziomach struktur/funkcji ciała, aktywności i uczestnictwa zgodnie z ICF. Wykazano, że u pacjentów po udarze mózgu ćwiczenia w środowisku wirtualnym mogą mieć przewagę nad terapią konwencjonalną w zakresie wpływu na składniki ICF, takie jak struktury i funkcje ciała, gdzie (oceny dokonywano najczęściej przy użyciu protokołu Fugl-Meyer Upper Extremity, który zawiera elementy badania ruchów globalnych, precyzyjnych, chwytu, szybkości ruchu, a także odruchów, czucia i ruchomości (Fugl-Meyer i in., 1975) oraz aktywności (ocena przy użyciu: Box and Blocks Test, Functional Independent Measure lub Barthel Index). Nie znaleziono natomiast takiej korzyści w przypadku uczestnictwa zgodnie z ICF. Wstępne wyniki sugerują także korzystny wpływ terapii z wykorzystaniem nowoczesnych technologii na funkcje poznawcze.

Przeprowadzona przez de Rooij i in. (2019) metaanaliza dotycząca strategii nakierowanych na trening równowagi i chodu wskazuje, że dodanie ćwiczeń opartych na cyfrowych technologiach zwiększa skuteczność procesu rehabilitacji. Do podobnych wniosków prowadzi także kolejna praca (Dominguez-Tellez i in., 2019). Autorzy podkreślają, że interwencje VR w połączeniu ze standardowym usprawnianiem są skuteczne w aspekcie poprawy omawianych funkcji, jednak z uwagi na różnorodność interwencji i analizowanych zmiennych nie można wskazać najbardziej efektywnej formy terapii.

4.2. Cyfrowa rehabilitacja osób starszych

Zmiany fizjologiczne zachodzące w starzejącym się organizmie, rosnąca z wiekiem liczba chorób przewlekłych czy też sukcesywnie zmniejszający się poziom aktywności fizycznej powodują, że osoby starsze są zagrożone pogarszaniem się sprawności funkcjonalnej, włączając w to utratę samodzielności. Głównym celem rehabilitacji geriatrycznej, w zależności od indywidualnych potrzeb pacjenta, jest zapobieganie utracie sprawności funkcjonalnej, a także jej utrzymanie i poprawa.

Do podstawowych problemów pacjentów starszych zaliczają się zaburzenia mobilności (w tym zaburzenia chodu), sarkopenia, zespół słabości, zaburzenia koordynacji i równowagi (których poważną konsekwencją są upadki), wielochorobowość, deficyty poznawcze, zaburzenia nastroju. Wszystkie te problemy wiążą się z ryzykiem pogarszania się sprawności funkcjonalnej seniorów. Jednym z ważniejszych środków wykorzystywanych w fizjoterapii geriatrycznej i profilaktyce niepełnosprawności jest aktywność fizyczna i ćwiczenia. Niestety, pomimo dowodów na skuteczność aktywności fizycznej w profilaktyce niepełnosprawności oraz chorób przewlekłych (Chodzko-Zajko i in., 2009), szczególnie wśród seniorów, stopień realizacji zaleceń odpowiedniego poziomu aktywności ruchowej jest niewielki (Kostka, 2017; GUS, 2018). Powoduje to konieczność poszukiwania takich aktywności, które będą dla seniorów atrakcyjne, ale jednocześnie bezpieczne i umożliwiające zapewnienie odpowiedniego obciążenia treningowego.

Gry interaktywne i środowisko wirtualne kojarzone są zazwyczaj z młodym pokoleniem, jednak szereg korzyści wynikających z zastosowania cyfrowej rzeczywistości powoduje, że coraz chętniej z nowych technologii korzystają również seniorzy (Corregidor-Sánchez i in., 2020). W piśmiennictwie międzynarodowym coraz częściej pojawiają się badania dotyczące zastosowania systemów opartych na wirtualnych interfejsach wspierających funkcje ruchowe (Corregidor-Sánchez i in., 2020), w tym przede wszystkim równowagę i chód (Lei i in., 2019), poznawcze (Torpil i in., 2020), a nawet wpływające na funkcjonowanie społeczne (Li i in., 2018). Najwięcej badań z zakresu wykorzystania nowych technologii w rehabilitacji geriatrycznej dotyczy pacjentów po udarze mózgu i z chorobą Parkinsona.

W rehabilitacji starszych pacjentów stosowane są zarówno specjalnie zaprojektowane dla potrzeb rehabilitacji systemy (tzw. technologie specyficzne), jak i komercyjnie dostępne urządzenia służące przede wszystkim do zapewnienia rozrywki (tzw. technologie niespecyficzne np. Nintendo Wii, Xbox, Play Station, Xavi Sport). Zgodnie z wynikami badań przeglądowych (Corregidor-Sánchez i in., 2020) terapie z wykorzystaniem obu typów urządzeń mają pozytywny wpływ na sprawność

funkcjonalną seniorów w porównaniu z konwencjonalną terapią lub jej brakiem. Technologie niespecyficzne wydają się być bardziej skuteczne, ale jakość dowodów dla technologii specyficznych jest wyższa.

W kontekście pandemii niewątpliwą zaletą technologii związanych z VR jest możliwość ich wykorzystania w ramach telerehabilitacji (Mantovani i in., 2020). Konieczność zachowania dystansu społecznego (szczególnie w grupie osób starszych), ograniczony dostęp do rehabilitacji stacjonarnej i ambulatoryjnej sprawiają, że usprawnianie wspomagane przez VR może stać się ciekawym i dostępnym sposobem terapii starszych pacjentów. Zastosowanie w telerehabilitacji zarówno elementów grywalizacji, jak i możliwość zdalnej kontroli poczynąń pacjenta umożliwia programowanie, korektę parametrów treningu i śledzenie postępów w terapii na odległość bez konieczności bezpośredniego kontaktu z terapeutą (Robert i in., 2014).

4.2.1. Cyfrowe technologie stosowane u osób starszych z deficytami motorycznymi i ograniczeniem sprawności funkcjonalnej

Jednym z charakterystycznych dla starzenia zespołów prowadzących do pogarszania się sprawności funkcjonalnej jest zespół słabości/kruchości (ang. *Frailty Syndrome*, FS). Jest on wynikiem wyczerpywania się rezerw fizjologicznych organizmu i wiąże się ze zwiększoną podatnością na czynniki stresogenne. Konsekwencją FS jest postępująca zależność, pogorszenie jakości życia, wzrost ryzyka upadków, instytucjonalizacji i zgonu. Nie ma jednoznacznej definicji FS. Do opisu i rozpoznania syndromu najczęściej wykorzystywane są kryteria wg Fried i in. (2001), do których należą osłabienie, niezamierzona utrata masy ciała, uczucie wyczerpania, spowolnienie chodu oraz obniżona aktywność fizyczna.

Celem rehabilitacji w tej grupie pacjentów jest przede wszystkim poprawa sprawności funkcjonalnej i jak najdłuższe utrzymanie samodzielności pacjentów. Badania wskazują na korzyści wynikające z połączenia gier wideo z ćwiczeniami fizycznymi (ang. *exergaming*) w grupie pacjentów z FS lub zagrożonych FS (ang. *pre-frail*). W pracy przeglądowej Zheng i in. (2020) wykazano, że tego typu interwencje mogą poprawić równowagę i mobilność, a w połączeniu z progresywnym treningiem oporowym – wpłynąć na poprawę siły mięśniowej. Jest to istotna kwestia ze względu na stopniową (postępującą wraz z wiekiem) utratę masy i funkcji mięśni (sarkopenia) oraz związek siły mięśniowej z poziomem sprawności funkcjonalnej oraz ryzykiem upadku (Landi i in., 2012). Podkreśla się jednak konieczność prowadzenia dalszych badań w tym zakresie dla potwierdzenia dotychczasowych wyników.

Jednym z objawów FS jest spowolnienie chodu. Zastosowanie systemów VR umożliwia również fizjoterapię w zakresie tej funkcji. Stosowane w tym celu programy u pacjentów z chorobą Parkinsona wydają się być przydatne w planach usprawniania innych grup starszych pacjentów, w tym z FS. W badaniu Gilat i in. (2013) uczestnicy siedzący przed ekranem komputera zostali poproszeni o poruszanie się w wirtualnym korytarzu za pomocą pedałów (lewy i prawy pedały musiały być naciskane naprzemiennie, o ok. 30 stopni poniżej poziomu) z częstotliwością zbliżoną do klasycznego chodu (ok. 2 Hz). Podczas marszu na ekranie pojawiały się komendy, takie jak: „idź” czy „stop”. Trening ten pozwala na doskonalenie naprzemiennego chodu oraz wymusza konieczność reakcji na wyświetlone informacje. Program umożliwia prowadzenie treningu z tzw. podwójnym zadaniem – poza ćwiczeniem motorycznym (marsz) pacjenci dostają zadanie kognitywne (np. wymienianie liczb parzystych/nieparzystych – w zależności od pojawiającej się na ekranie komendy, zadania oparte o test Stroopa itd.). Badania wskazują, że programy treningowe z podwójnym zadaniem (kognitywno-fizycznym) korzystnie wpływają na funkcje poznawcze, sprawność w zakresie czynności dnia codziennego (ADL) oraz nastój (Karssemeijer i in., 2017). Atrakcyjną formę ćwiczeń w systemach VR stanowią gry z wykorzystaniem tańca. Programy te mogą wpływać na poprawę funkcji psychicznych i ruchowych (zakres ruchu, siła mięśni, równowaga), co potencjalnie może ograniczyć ryzyko upadku u starszych osób (Gallo i in., 2019; Rodrigues i in., 2018; Lee i in., 2015). Przykładem wideogry tanecznej jest Dance Dance Revolution (Smith i in., 2011). System wyposażony jest w matę z panelami czułymi na postawienie kroku, na której stoi ćwiczący, reagujący na sygnały pojawiające się na monitorze. Zaletą systemów wirtualnych o różnym stopniu im-

mersji jest ich atrakcyjna forma, elementy gry, zabawy, co powoduje, że technologie te w istotny sposób mogą zachęcać seniorów do podejmowania aktywności fizycznej i stanowić formę aktywizacji osób starszych (Kappen i in., 2019).

4.2.2. Cyfrowe technologie wspierające funkcjonowanie poznawcze osób w starszym wieku

Wraz z wiekiem rośnie ryzyko pogarszania się funkcji poznawczych. Mogą one mieć formę łagodnych zaburzeń (ang. *Mild Cognitive Impairment*, MCI), które wiążą się z deficytem funkcji poznawczych, przede wszystkim pamięci, ale z reguły pozwalają na samodzielne funkcjonowanie. Występowanie MDI stwarza jednak ryzyko rozwoju otępienia, w tym związanego z chorobą Alzheimera (Petersen, 2011). Dlatego też trening wspierający funkcje poznawcze może być cennym uzupełnieniem postępowania fizjoterapeutycznego i wpływać na sprawność funkcjonalną seniorów z uwagi na motywujący i zabawowy charakter. Wyniki metaanaliz i przeglądów systematycznych (Kim i in., 2019, Coyle i in., 2015) sugerują (efekt mały do średniego), że interwencje, szczególnie z częściową immersją, pozytywnie wpływają na różne aspekty kliniczne u pacjentów z deficytami poznawczymi. W badaniach Manery i in. (2016) pacjenci z MCI i z demencją byli bardziej zainteresowani treningiem poznawczym prowadzonym w oparciu o VR i zadowoleni z niego niż wersją „papierową”, nawet jeśli zadania stosowane w terapii z VR były trudniejsze. Ponadto apatyczni uczestnicy wykazywali silniejszą preferencję dla zadań w VR niż uczestnicy nieapatyczni.

W programach dotyczących treningu funkcji poznawczo-behawioralnych wykorzystywane są zadania ukierunkowane na poprawę poszczególnych składowych, np. pamięć, uwagę, funkcje wykonawcze, kojarzenie itd., podobne do stosowanych w klasycznej terapii, aczkolwiek przeniesione do wirtualnego środowiska (Ge i in., 2018). Progres zaburzeń poznawczych prowadzi do stopniowego ograniczenia funkcjonowania chorego w środowisku. Pacjenci z demencją zapominają, w jaki sposób wykonuje się codzienne czynności – początkowo złożone (ang. *Instrumental Activities of Daily Living*, IADL), a w dalszej kolejności również podstawowe (ang. *Basic Activities of Daily Living*, BADL). Dlatego poza programami nastawionymi na pojedyncze funkcje kognitywne projektuje się, w celu poprawy funkcjonowania pacjenta w środowisku, scenariusze wirtualne markujące rzeczywiste sytuacje życiowe, np. zakupy w sklepie, korzystanie z telefonu, przygotowywanie posiłków. Programy te służą zarówno do diagnostyki, jak i terapii pacjentów z zaburzeniami poznawczymi i funkcjonalnymi. Przykładem takiego systemu jest wirtualny supermarket (Paliokas i in., 2020). Zadaniem pacjentów jest robienie zakupów w oparciu o listę. Gracz musi odnaleźć wskazane produkty w odpowiednim dziale, włożyć je do koszyka, zlokalizować kasę, zapłacić za zakupy poprzez wybór banknotów i monet o odpowiednich nominałach. System umożliwia stopniowanie trudności zadania (np. wybór różnej liczby produktów z różnych kategorii, ukrycie listy podczas zakupów). Innym przykładem jest nieimmersyjna wirtualna kuchnia (Allain i in., 2014). System może być stosowany u pacjentów z zaburzeniami poznawczymi do diagnostyki, ale również terapii. W wirtualnej kuchni pacjent proszony jest np. o przygotowanie kawy. Zadanie to wymaga wykonania kilku następujących po sobie kroków, takich jak: otwarcie szuflady, w której znajduje się kawa, wybór filtra/kawy, manipulacja przy ekspresie do kawy itd., co może stanowić wyzwanie także dla osób z zaburzeniami funkcji kognitywnych.

Poprawę w zakresie funkcji poznawczych może przynieść zarówno trening poznawczy, jak i oparty na ćwiczeniach fizycznych (Gheysen i in., 2018). Jednak wspomniane wcześniej interwencje związane z tzw. podwójnym kognitywno-fizycznym zadaniem mogą przynosić więcej korzyści dla funkcjonowania poznawczego w porównaniu z programami jednozadaniowymi (Zhu i in., 2016).

Poza korzyściami wynikającymi z zastosowania VR w grupie seniorów należy wziąć pod uwagę pewne ograniczenia. Osoby starsze, szczególnie z zespołem słabości, sarkopenią, zaburzeniami poznawczymi są zagrożone upadkiem. W takim kontekście niektóre gry mogą być zbyt wymagające, a nawet ryzykowne dla seniorów. Wynika to z faktu, że większość obecnie używanych gier została opracowana do celów rozrywkowych oraz z myślą o „typowym”, zdrowym użytkowniku. Z tego względu podczas prowadzenia terapii należy pamiętać o zapewnieniu bezpieczeństwa i odpowiedniej asekuracji pacjentom. Słabsi seniorzy, szczególnie z towarzyszącymi zaburzeniami

poznawczymi, mogą wykazywać niski stopień akceptacji technologii ze względu na ogólną niechęć do nowoczesnych urządzeń (Serino i in., 2017). Ponadto u osób starszych należy liczyć się z ryzykiem pojawienia się objawów tzw. choroby symulatorowej, co ogranicza możliwość stosowania systemów pełnej immersji, szczególnie u pacjentów z zaburzeniami poznawczymi (Arns i Cerney, 2005).

Badania dotyczące zastosowania nowoczesnych cyfrowych technologii w grupie osób starszych wykazują dużą niejednorodność i nie zawsze charakteryzują się dobrą jakością (mała liczebność grup, ryzyko błędu, brak zaślepienia badaczy, brak obserwacji pointerwencyjnych), dlatego ich wyniki należy traktować z ostrożnością, a wielu autorów prac przeglądowych podkreśla konieczność kontynuowania dobrej jakości badań w tym zakresie (Corregidor-Sánchez i in., 2020). Niemniej ćwiczenia oparte o interfejsy immersyjne, pomimo tego, że nie zawsze wykazują większą skuteczność w stosunku do klasycznie stosowanych metod, mogą stanowić ciekawe i motywujące do aktywności propozycje dla seniorów.

5. Podsumowanie

Zastosowanie najnowszych zdobyczy technologicznych w wirtualnej czy też tzw. cyfrowej rehabilitacji powoli zaczyna być nowym trendem zarówno w pracach badawczych, jak i codziennej praktyce. Należy jednak ponownie podkreślić, że w tym kontekście przymiotnik „wirtualny” jest używany jako synonim słowa „cyfrowy”, tj. oparty na systemie komputerowym, co samo w sobie nie oznacza automatycznie zastosowania immersyjnego interfejsu wirtualnej rzeczywistości (VR). Można tutaj wymienić m.in. coraz liczniejsze przypadki wykorzystania różnorodnych interfejsów wirtualnych (m.in. VR, AR, MR), stanowiących relatywnie nową grupę technologii informatycznych o rosnącej użyteczności w wielu zastosowaniach w dziedzinie medycyny.

Takie środowisko jest bardzo obiecujące, motywujące, łatwe do indywidualizacji i kontroli oraz stosunkowo bezpieczne w kontekście odbudowy funkcji ruchowych i poznawczych (Gandolfi i in., 2017; Laver i in., 2017). Kluczową cechą większości takich systemów jest interakcja z wykreowanymi komputerowo elementami lub całkowicie sztucznym, wirtualnym otoczeniem, który to kontakt przebiega najczęściej w czasie rzeczywistym. Jednakże obecne dowody na przewagę skuteczności określonych rodzajów wirtualnej rehabilitacji są ograniczone (Aminov i in., 2018, 2017; Lei i in., 2019; Lohse i in., 2014).

Trening tego typu wykazuje wszelkie cechy wartościowego uzupełnienia konwencjonalnej terapii: zadaniowy charakter, różnorodność, wzmocnienie oraz rozszerzenie informacji zwrotnej, motywująca do wydłużenia czasu ćwiczeń i podejmowania systematycznej aktywności forma (wzbogacony cyfrowo, wirtualny obraz i elementy grywalizacji) (Levin i in., 2015). Dzięki możliwości pracy zdalnej wirtualna rehabilitacja w formie telerehabilitacji może być wykorzystywana w terapii domowej przez pacjentów, którzy oczekują kontynuacji leczenia lub stanowią metodę z wyboru (Gandolfi i in., 2017; Mantovani i in., 2020). Nabiera to szczególnego znaczenia w sytuacji epidemii, co powinno przełożyć się na upowszechnienie takich strategii oraz przyczynić się do zwiększenia ich dostępności. Cyfrowa rehabilitacja wspomagana przez nowoczesne technologie informatyczne jest najczęściej kompleksowa, oddziałuje zarówno na funkcje ruchowe, jak i poznawczo-behawioralne (Aminov i in., 2018; Lei i in., 2019; Massetti i in., 2016; Massetti i in., 2018). Ponadto program usprawniania łatwo zindywidualizować poprzez możliwość dopasowania stopnia trudności ćwiczeń do aktualnych potrzeb i stanu pacjenta. Dodatkowym atutem takich systemów jest możliwość rejestrowania wyników i prowadzenia statystyk, a także analiza zebranych danych. Ułatwia to monitorowanie postępów rehabilitacji i bieżące dobieranie najkorzystniejszych parametrów ćwiczeń w celu optymalizacji całego procesu.

Przegląd piśmiennictwa i obserwacje własne pierwszego autora wskazują, że implementacja ćwiczeń z zastosowaniem elementów innowacyjnych technologii cyfrowych może urozmaicić rehabilitację i być cennym uzupełnieniem konwencjonalnej terapii u chorych: neurologicznych (Aminov i in., 2018; Hatem i in., 2016; Laver i in., 2017; Lohse i in., 2014), ortopedycznych (Gumaa i Rehan Youssef, 2019) oraz geriatrycznych (Corregidor-Sánchez i in., 2021). Ta nowoczesna forma

terapii może mieć także pozytywny wpływ na poprawę funkcji poznawczych u pacjentów: po udarze mózgu (Aminov i in., 2018), z chorobą Parkinsona (Lei i in., 2019) oraz z rozpoznanym stwardnieniem rozsianym (Masseti i in., 2016). Przewagę cyfrowej rehabilitacji nad konwencjonalnymi metodami usprawniania zaobserwowano m.in. w zakresie wpływu na struktury/funkcje ciała (w aspekcie oceny sensomotorycznej kończyny górnej) (Aminov i in., 2018) oraz aktywności u chorych po udarze mózgu (Aminov i in., 2018; Lohse i in., 2014), a także wpływu na długość kroków, równowagę i mobilność pacjentów z chorobą Parkinsona (Lei i in., 2019). Dodatkowo zauważono trend sugerujący korzyści wypływające z większej intensywności ćwiczeń (Laver i in., 2017). Autorzy cytowanych prac przeglądowych podkreślają jednak, że przedstawione przez nich wyniki badań należy traktować z ostrożnością z uwagi na zróżnicowanie interwencji oraz grup włączanych pacjentów i/lub niską jakość metodologiczną (de Rooij i in., 2016; Miguel-Rubio i in., 2020).

Ograniczenie takich form terapii może natomiast wynikać z: pracy przy monitorze ekranowym (lub przy użyciu innego wyświetlacza), braku odpowiednich rozwiązań promujących jakość ruchu oraz umożliwiających bezpieczne wykonywanie ćwiczeń w dowolnej pozycji i w pełnym zakresie (tańsze, spersonalizowane systemy oraz konsolowe gry komputerowe), konieczności zakupu dodatkowego sprzętu i oprogramowania, a także nauki obsługi systemu (Burdea, 2003; Levin i in., 2015).

Odpowiednia kwalifikacja i indywidualne dopasowanie programów ćwiczeń mogą przynieść wiele dodatkowych korzyści i uatrakcyjnić przebieg procesu rehabilitacji chorych z różnymi problemami klinicznymi. Ważnym obszarem do dalszych analiz jest identyfikacja czynników wpływających na skuteczność programów wirtualnej rehabilitacji oraz opracowanie szczegółowej metodyki usprawniania w aspekcie optymalnego czasu, częstotliwości i intensywności treningu, jak również rodzaju ćwiczeń dla poszczególnych grup pacjentów. Ze względu na stały i bardzo dynamiczny rozwój technologii informatycznych wciąż istnieje potrzeba prowadzenia dalszych badań z tego zakresu tematycznego.

Podziękowania: Autorzy niniejszej pracy chcieliby wyrazić podziękowanie firmie Titanis sp. z o.o. za bezpłatne udostępnienie platformy *Neuroforma* (www.neuroforma.pl) oraz firmie Brontes Processing sp. z o.o. za bezpłatne udostępnienie systemu *SeeMe* (<http://pl.brontesprocessing.com>).

Bibliografia

- Adamovich S.V., Fluet G.G., Mathai A., Qiu Q., Lewis J., Merians A.S. 2009. Design of a complex virtual reality simulation to train finger motion for persons with hemiparesis: a proof of concept study. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* 6, nr artykułu: 28. DOI: [10.1186/1743-0003-6-28](https://doi.org/10.1186/1743-0003-6-28).
- Allain P., Foloppe D.A., Besnard J., Yamaguchi T., Etcharry-Bouyx F., Le Gall D., Nolin P., Richard P. 2014. Detecting everyday action deficits in Alzheimer's disease using a nonimmersive virtual reality kitchen. *Journal of the International Neuropsychological Society* 20(5), str. 468–477. DOI: [10.1017/S1355617714000344](https://doi.org/10.1017/S1355617714000344).
- Aminov A., Rogers J.M., Middleton S., Caeyenberghs K., Wilson P.H. 2018. What do randomized controlled trials say about virtual rehabilitation in stroke? A systematic literature review and meta-analysis of upper-limb and cognitive outcomes. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* 15(1), nr artykułu: 29. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12984-018-0370-2>.
- Ansuini C., Pierno A.C., Lusher D., Castiello U. 2006. Virtual reality applications for the remapping of space in neglect patients. *Restorative Neurology and Neuroscience* 24(4–6), str. 431–441.
- Arns L.L., Cerney M.M. 2005. The relationship between age and incidence of cybersickness among immersive environment users. *IEEE Proceedings Virtual Reality*, str. 267–268. DOI: [10.1109/VR.2005.1492788](https://doi.org/10.1109/VR.2005.1492788).
- Benjamin E.J., Virani S.S., Callaway C.W., Chamberlain A.M., Chang A.R., Cheng S., Chiuve S.E., Cushman M., Delling F.N., Deo R., de Ferranti S.D., Ferguson J.F., Fornage M., Gillespie C., Isasi C.R., Jiménez M.C., Jordan L.C., Judd S.E., Lackland D., Lichtman J.H., Lisabeth L., Liu S., Longenecker C.T., Lutsey P.L., Mackey J.S., Matchar D.B., Matsushita K., Mussolino M.E., Nasir K., O'Flaherty M., Palaniappan L.P., Pandey A., Pandey D.K., Reeves M.J., Ritchey M.D., Rodriguez C.J., Roth G.A., Rosamond W.D., Sampson U.K.A., Satou G.M., Shah S.H., Spartano N.L., Tirschwell D.L., Tsao C.W., Voeks J.H., Willey J.Z., Wilkins J.T., Wu J.H., Alger H.M., Wong S.S., Muntner P. 2018. Heart Disease and Stroke

- Statistics-2018 Update: A Report From the American Heart Association. *Circulation* 137(12), e67–e492. DOI: [10.1161/CIR.0000000000000558](https://doi.org/10.1161/CIR.0000000000000558).
- Bezerra Í., Crocetta T.B., Massetti T., Silva T., Guarnieri R., Meira C.M., Jr Arab C., Abreu L.C., Araujo L.V., Monteiro C. 2018. Functional performance comparison between real and virtual tasks in older adults: A cross-sectional study. *Medicine* 97(4), e9612. DOI: [10.1097/MD.00000000000009612](https://doi.org/10.1097/MD.00000000000009612).
- Błażejewska-Hyżorek B., Czernuszenko A., Członkowska A., Ferens A., Gąsecki D., Kaczorowski R., Karaszewski B., Karliński M., Kaźmierski R., Kłysz B., Kobayashi A., Kozera G., Kozubski W., Krawczyk M., Kuczyńska A., Kurkowska-Jastrzębska I., Kwolek A., Luchowski P., Niewada M., Nowacki P., Nyka W., Opala G., Opara J., Poncyljusz W., Rejda K., Roźniecki J., Ryglewicz D., Sarzyńska-Długosz I., Seniów J., Skowrońska M., Sobolewski P., Staszewski J., Szczepańska-Szerej A., Szczudlik A., Wiszniewska M. 2019. Wytyczne postępowania w udarze mózgu. *Polski Przegląd Neurologiczny* 15(Supl. A), str. 1–156. DOI: [10.5603/PPN.2019.0001](https://doi.org/10.5603/PPN.2019.0001).
- Bogousslavsky J., Van Melle G., Regli F. 1988. The Lausanne Stroke Registry: analysis of 1,000 consecutive patients with first stroke. *Stroke* 19(9), str. 1083–1092. DOI: [10.1161/01.str.19.9.1083](https://doi.org/10.1161/01.str.19.9.1083).
- Brunner I., Skouen J.S., Hofstad H., Aßmuss J., Becker F., Pallesen H., Thijs L., Verheyden G. 2016. Is upper limb virtual reality training more intensive than conventional training for patients in the subacute phase after stroke? An analysis of treatment intensity and content. *BMC Neurology* 16(1), nr artykułu: 219. DOI: [10.1186/s12883-016-0740-y](https://doi.org/10.1186/s12883-016-0740-y).
- Brunner I., Skouen J.S., Hofstad H., Strand L.I., Becker F., Sanders A.M., Pallesen H., Kristensen T., Michielsen M., Verheyden G. 2014. Virtual reality training for upper extremity in subacute stroke (VIRTUES): study protocol for a randomized controlled multicenter trial. *BMC Neurology* 14, nr artykułu: 186. DOI: [10.1186/s12883-014-0186-z](https://doi.org/10.1186/s12883-014-0186-z).
- Burdea G.C. 2003. Virtual rehabilitation – benefits and challenges. *Methods of Information in Medicine* 42(5), str. 519–523. DOI: [10.1055/s-0038-1634378](https://doi.org/10.1055/s-0038-1634378).
- Burke J.W., McNeill M., Charles D.K., Morrow P.J., Crosbie J.H., McDonough S.M. 2009. Optimising engagement for stroke rehabilitation using serious games. *The Visual Computer* 25, nr artykułu: 1085. DOI: [10.1007/s00371-009-0387-4](https://doi.org/10.1007/s00371-009-0387-4).
- Cannell J., Jovic E., Rathjen A., Lane K., Tyson A.M., Callisaya M.L., Smith S.T., Ahuja K.D., Bird M.L. 2018. The efficacy of interactive, motion capture-based rehabilitation on functional outcomes in an inpatient stroke population: a randomized controlled trial. *Clinical Rehabilitation* 32(2), str. 191–200. DOI: [10.1177/0269215517720790](https://doi.org/10.1177/0269215517720790).
- Cano Porras D., Siemonsma P., Inzelberg R., Zeilig G., Plotnik M. 2018. Advantages of virtual reality in the rehabilitation of balance and gait. *Systematic review. Neurology* 90(22), str. 1017–1025. DOI: [10.1212/WNL.0000000000005603](https://doi.org/10.1212/WNL.0000000000005603).
- Carey L.M., Matyas T.A. 2011. Frequency of discriminative sensory loss in the hand after stroke in a rehabilitation setting. *Journal of Rehabilitation Medicine* 43(3), str. 257–263. DOI: [10.2340/16501977-0662](https://doi.org/10.2340/16501977-0662).
- Chen Y., Fanchiang H.D., Howard A. 2018. Effectiveness of Virtual Reality in Children With Cerebral Palsy: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. *Physical Therapy* 98(1), str. 63–77. DOI: [10.1093/ptj/pzx107](https://doi.org/10.1093/ptj/pzx107).
- Chodzko-Zajko W.J., Proctor D.N., Singh F., Minson C.T., Nigg C.R., Salem G.J., Skinner J.S. 2009. American College of Sports Medicine position stand. Exercise and physical activity for older adults. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 41(7), str. 1510–1530. DOI: [10.1249/MSS.0b013e3181a0c95c](https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3181a0c95c).
- Cirstea M.C., Levin M.F. 2000. Compensatory strategies for reaching in stroke. *Brain: A Journal of Neurology* 123(5), str. 940–953. DOI: [10.1093/brain/123.5.940](https://doi.org/10.1093/brain/123.5.940).
- Cirstea M.C., Ptilo A., Levin M.F. 2003. Arm reaching improvements with short-term practice depend on the severity of the motor deficit in stroke. *Experimental Brain Research* 152(4), str. 476–488. DOI: [10.1007/s00221-003-1568-4](https://doi.org/10.1007/s00221-003-1568-4).
- Colomer C., Baldoví A., Torromé S., Navarro M.D., Moliner B., Ferri J., Noé E. 2013. Efficacy of Armeo® Spring during the chronic phase of stroke. Study in mild to moderate cases of hemiparesis. *Neurologia* 28(5), str. 261–267. DOI: [10.1016/j.nrl.2012.04.017](https://doi.org/10.1016/j.nrl.2012.04.017).
- Corregidor-Sánchez A.I., Segura-Fragoso A., Criado-Álvarez J.J., Rodríguez-Hernández M., Mohedano-Moriano A., Polonio-López B. 2020. Effectiveness of Virtual Reality Systems to Improve

- the Activities of Daily Life in Older People. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17(17), 6283. DOI: [10.3390/ijerph17176283](https://doi.org/10.3390/ijerph17176283).
- Corregidor-Sánchez A.I., Segura-Fragoso A., Rodríguez-Hernández M., Jiménez-Rojas C., Polonio-López B., Criado-Álvarez J.J. 2021. Effectiveness of virtual reality technology on functional mobility of older adults: systematic review and meta-analysis. *Age and Ageing* 50(2), str. 370–379. DOI: [10.1093/ageing/afaa197](https://doi.org/10.1093/ageing/afaa197).
- Cortés-Pérez I., Zagalaz-Anula N., Montoro-Cárdenas D., Lomas-Vega R., Obrero-Gaitán E., Osuna-Pérez M.C. 2021. Leap Motion Controller Video Game-Based Therapy for Upper Extremity Motor Recovery in Patients with Central Nervous System Diseases. A Systematic Review with Meta-Analysis. *Sensors* 21(6), nr artykułu: 2065. DOI: [10.3390/s21062065](https://doi.org/10.3390/s21062065).
- Coyle H., Traynor V., Solowij N. 2015. Computerized and virtual reality cognitive training for individuals at high risk of cognitive decline: systematic review of the literature. *The American Journal of Geriatric Psychiatry: official journal of the American Association for Geriatric Psychiatry* 23(4), str. 335–359. DOI: [10.1016/j.jagp.2014.04.009](https://doi.org/10.1016/j.jagp.2014.04.009).
- Cruz-Neira C., Sandin D.J., DeFanti T.A. 1993. Surround-Screen Projection-based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE. *SIGGRAPH'93: Proceedings of the 20th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, str. 135–142. DOI: [10.1145/166117.166134](https://doi.org/10.1145/166117.166134).
- Czernuszenko A., Członkowska A. 2009. Risk factors for falls in stroke patients during inpatient rehabilitation. *Clinical Rehabilitation* 23(2), str. 176–188. DOI: doi.org/10.1177/0269215508098894.
- Dexta Robotics Dexmo Gloves. Dostępne online: <https://www.dextarobotics.com/> (dostęp: 14.03.2022).
- Dhamoon MS, Moon YP, Paik MC, Boden-Albala B, Rundek T, Sacco RL, Elkind MS. 2009. Long-term functional recovery after first ischemic stroke: the Northern Manhattan Study. *Stroke* 40(8), str. 2805–2811. DOI: [10.1161/STROKEAHA.109.549576](https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.109.549576).
- Diemer J., Alpers G.W., Peperkorn H.M., Shiban Y., Mühlberger A. 2015. The impact of perception and presence on emotional reactions: a review of research in virtual reality. *Frontiers in Psychology* 6, 26. DOI: [10.3389/fpsyg.2015.00026](https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00026).
- Djaouti D., Alvarez J., Jessel J.P. 2011. Classifying Serious Games: The G/P/S Model. W: Felicia P. (red.) *Handbook of Research on Improving Learning and Motivation through Educational Games: Multidisciplinary Approaches*. DOI: [10.4018/978-1-60960-495-0.ch006](https://doi.org/10.4018/978-1-60960-495-0.ch006).
- Dominguez-Tellez P., Moral-Munoz J.A., Casado-Fernandez E., Salazar A., Lucena-Anton D. 2019. Efectos de la realidad virtual sobre el equilibrio y la marcha en el ictus: revision sistematica y metaanalisis [Effects of virtual reality on balance and gait in stroke: a systematic review and meta-analysis]. *Revista de Neurologia* 69(6), str. 223–234. DOI: [10.33588/rn.6906.2019063](https://doi.org/10.33588/rn.6906.2019063).
- Fang Y., Tao Q., Zhou X., Chen S., Huang J., Jiang Y., Wu Y., Chen L., Tao J., Chan C.C. 2017. Patient and Family Member Factors Influencing Outcomes of Poststroke Inpatient Rehabilitation. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation* 98(2), str. 249–255.e2. DOI: [10.1016/j.apmr.2016.07.005](https://doi.org/10.1016/j.apmr.2016.07.005).
- Faria-Fortini I., Michaelsen S.M., Cassiano J.G., Teixeira-Salmela L.F. 2011. Upper extremity function in stroke subjects: relationships between the international classification of functioning, disability, and health domains. *Journal of Hand Therapy: official Journal of the American Society of Hand Therapists* 24(3), str. 257–265. DOI: [10.1016/j.jht.2011.01.002](https://doi.org/10.1016/j.jht.2011.01.002).
- Fisahn C., Aach M., Jansen O., Moisi M., Mayadev A., Pagarigan K.T., Dettori J.R., Schildhauer T.A. 2016. The Effectiveness and Safety of Exoskeletons as Assistive and Rehabilitation Devices in the Treatment of Neurologic Gait Disorders in Patients with Spinal Cord Injury: A Systematic Review. *Global Spine Journal* 6(8), str. 822–841. DOI: <https://doi.org/10.1055/s-0036-1593805>.
- Fitzgerald S.G., Cooper R.A., Thorman T., Cooper R., Guo S., Boninger M.L. 2004. The GAME(Cycle) exercise system: comparison with standard ergometry. *The Journal of Spinal cord Medicine* 27(5), str. 453–459. DOI: [10.1080/10790268.2004.11752237](https://doi.org/10.1080/10790268.2004.11752237).
- Fried L.P., Tangen C.M., Walston J., Newman A.B., Hirsch C., Gottdiener J., Seeman T., Tracy R., Kop W.J., Burke G., McBurnie M.A. 2001. Frailty in older adults: evidence for a phenotype. *The Journals of Gerontology: Series A, Biological Sciences and Medical Sciences* 56(3), str. M146–M156. DOI: [10.1093/gerona/56.3.m146](https://doi.org/10.1093/gerona/56.3.m146).
- Fugl-Meyer A.R., Jaasko L., Leyman I., Olsson S., Steglind S. 1975. The post-stroke hemiplegic patient. 1. a method for evaluation of physical performance. *Scandinavian Journal of Rehabilitation Medicine* 7(1), str. 13–31.

- Gallo L.H., Rodrigues E.V., Filho J.M., da Silva J.B., Harris-Love M.O., Gomes A.R.S. 2019. Effects of virtual dance exercise on skeletal muscle architecture and function of community dwelling older women. *Journal of Musculoskeletal & Neuronal Interactions* 19(1), str. 50–61.
- Gandolfi M., Geroin C., Dimitrova E., Boldrini P., Waldner A., Bonadiman S., Picelli A., Regazzo S., Stirbu E., Primon D i in. 2017. Virtual Reality Telerehabilitation for Postural Instability in Parkinson's Disease: A Multicenter, Single-Blind, Randomized, Controlled Trial. *BioMed Research International* 2017, nr artykułu: 7962826. DOI: [10.1155/2017/7962826](https://doi.org/10.1155/2017/7962826).
- GBD 2016 Stroke Collaborators. 2019. Global, regional, and national burden of stroke, 1990–2016: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2016. *The Lancet. Neurology* 18(5), str. 439–458. DOI: [10.1016/S1474-4422\(19\)30034-1](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(19)30034-1).
- Ge S., Zhu Z., Wu B., McConnell E.S. 2018. Technology-based cognitive training and rehabilitation interventions for individuals with mild cognitive impairment: a systematic review. *BMC Geriatrics* 18(1), nr artykułu: 213. DOI: [10.1186/s12877-018-0893-1](https://doi.org/10.1186/s12877-018-0893-1).
- Gheysen F., Poppe L., DeSmet A., Swinnen S., Cardon G., De Bourdeaudhuij I., Chastin S., Fias W. 2018. Physical activity to improve cognition in older adults: can physical activity programs enriched with cognitive challenges enhance the effects? A systematic review and meta-analysis. *The International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity* 15(1), nr artykułu: 63. DOI: [10.1186/s12966-018-0697-x](https://doi.org/10.1186/s12966-018-0697-x).
- Gilat M., Shine J.M., Bolitho S.J., Matar E., Kamsma Y.P., Naismith S.L., Lewis S.J. 2013. Variability of Stepping during a Virtual Reality Paradigm in Parkinson's Disease Patients with and without Freezing of Gait. *PLoS One* 8(6), e66718. DOI: [10.1371/journal.pone.0066718](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0066718).
- Google Cloud. Dostępne online: <https://cloud.google.com/speech-to-text> (dostęp: 14.03.2022).
- Gorelick P.B. 2009. The future of stroke prevention by risk factor modification. *Handbook of Clinical Neurology* 94, str. 1261–1276. DOI: [10.1016/S0072-9752\(08\)94063-X](https://doi.org/10.1016/S0072-9752(08)94063-X).
- Gorisse G., Christmann O., Amato E.A., Richir S. 2017. First-and Third-Person Perspectives in immersive Virtual environments: Presence and Performance analysis of embodied Users. *Frontiers in Robotics and AI* 6, str. 8. DOI: [10.3389/frobt.2019.00008](https://doi.org/10.3389/frobt.2019.00008).
- Grau-Sanchez J., Munte T.F., Altenmüller E., Duarte E., RodríguezFornells A. 2020. Potential benefits of music playing in stroke upper limb motor rehabilitation. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews* 112, str. 585–599. DOI: [10.1016/j.neubiorev.2020.02.027](https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2020.02.027).
- Grefkes C., Fink G.R. 2020. Recovery from stroke: current concepts and future perspectives. *Neurological Research and Practice* 2, str. 17. DOI: [10.1186/s42466-020-00060-6](https://doi.org/10.1186/s42466-020-00060-6).
- Gu X., Zhang Y., Sun W., Bian Y., Zhou D., Kristensson P.O. 2016. Dexmo: An Inexpensive and Lightweight Mechanical Exoskeleton for Motion Capture and Force Feedback in VR. *CHI '16: Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. Association for Computing Machinery, Nowy York. DOI: [10.1145/2858036.2858487](https://doi.org/10.1145/2858036.2858487).
- Gumaa M., Rehan Youssef A. 2019. Is Virtual Reality Effective in Orthopedic Rehabilitation? A Systematic Review and Meta-Analysis. *Physical Therapy* 99(10), str. 1304–1325. DOI: [10.1093/ptj/pzz093](https://doi.org/10.1093/ptj/pzz093).
- GUS 2018. Informacja o sytuacji osób starszych na podstawie badań Głównego Urzędu Statystycznego Warszawa. Dostęp online: <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/osoby-starsze/osoby-starsze/sytuacja-osob-starszych-w-polsce-w-2018-roku,2,1.html> (dostęp: 20.04.2021).
- Hacmon R.R., Krasovsky T., Lamontagne A., Levin M.F. 2012. Deficits in intersegmental trunk coordination during walking are related to clinical balance and gait function in chronic stroke. *Journal of Neurologic Physical Therapy: JNPT* 36(4), str. 173–181. DOI: [10.1097/NPT.0b013e31827374c1](https://doi.org/10.1097/NPT.0b013e31827374c1).
- Hamzei F., Erath G., Kucking U., Weiller C., Rijntjes M. 2020. Anatomy of brain lesions after stroke predicts effectiveness of mirror therapy. *The European Journal of Neuroscience* 52(6), str. 3628–3641. DOI: [10.1111/ejn.14698](https://doi.org/10.1111/ejn.14698).
- Han L., Law-Gibson D., Reding M. 2002. Key neurological impairments influence function-related group outcomes after stroke. *Stroke* 33(7), str. 1920–1924. DOI: [10.1161/01.str.0000019792.59599.cc](https://doi.org/10.1161/01.str.0000019792.59599.cc).
- Hatem S.M., Saussez G., Della Faille M., Prist V., Zhang X., Dispa D., Bleyenheuft Y. 2016. Rehabilitation of Motor Function after Stroke: A Multiple Systematic Review Focused on Techniques to Stimulate Upper Extremity Recovery. *Frontiers in Human Neuroscience* 10, str. 442. DOI: [10.3389/fnhum.2016.00442](https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00442).

- Hendricks H.T., van Limbeek J., Geurts A.C., Zwarts M.J. 2002. Motor recovery after stroke: a systematic review of the literature. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation* 83(11), str. 1629–1637. DOI: [10.1053/apmr.2002.35473](https://doi.org/10.1053/apmr.2002.35473).
- Heuschmann P.U., Wiedmann S., Wellwood I., Rudd A., Di Carlo A., Bejot Y., Ryglewicz D., RastenYTE D., Wolfe C.D.; European Registers of Stroke 2011. Three-month stroke outcome: the European Registers of Stroke (EROS) investigators. *Neurology* 76(2), str. 159–165. DOI: [10.1212/WNL.0b013e318206ca1e](https://doi.org/10.1212/WNL.0b013e318206ca1e).
- Holden M.K. 2005. Virtual environments for motor rehabilitation: review. *Cyberpsychology & Behavior: the Impact of the Internet, Multimedia and Virtual Reality on Behavior and Society* 8(3), str. 187–219. DOI: [10.1089/cpb.2005.8.187](https://doi.org/10.1089/cpb.2005.8.187).
- Holden M.K., Dyar T.A., Dayan-Cimadoro L. 2007. Telerehabilitation using a virtual environment improves upper extremity function in patients with stroke. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering: a publication of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society* 15(1), str. 36–42. DOI: [10.1109/TNSRE.2007.891388](https://doi.org/10.1109/TNSRE.2007.891388).
- Hudson S., Matson-Barkat S., Pallamin N., Jegou G. 2019. With or without you? Interaction and immersion in a virtual reality experience. *Journal of Business Research* 100, str. 459–468. DOI: [10.1016/j.jbusres.2018.10.062](https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2018.10.062).
- Hughes C.L., Fidopiastis C., Stanney K.M., Bailey P.S., Ruiz E. 2020. The Psychometrics of Cybersickness in Augmented Reality. *Frontiers in Virtual Reality*, nr artykułu: 602954. DOI: [10.3389/frvir.2020.602954](https://doi.org/10.3389/frvir.2020.602954).
- ISVR. Dostępne online: <https://isvr.org/about-us/> (dostęp: 04.05.2021).
- Jack D., Boian R., Merians A.S., Tremaine M., Burdea G.C., Adamovich S.V., Recce M., Poizner H. 2001. Virtual reality-enhanced stroke rehabilitation. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering: a publication of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society* 9(3), str. 308–318. DOI: [10.1109/7333.948460](https://doi.org/10.1109/7333.948460).
- Jang S.H., You S.H., Hallett M., Cho Y.W., Park C.M., Cho S.H., Lee H.Y., Kim T.H. 2005. Cortical reorganization and associated functional motor recovery after virtual reality in patients with chronic stroke: an experimenter-blind preliminary study. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation* 86(11), str. 2218–2223. DOI: [10.1016/j.apmr.2005.04.015](https://doi.org/10.1016/j.apmr.2005.04.015).
- Jannink M.J., Aznar M., de Kort A.C., van de Vis W., Veltink P., van der Kooij H. 2009. Assessment of visuospatial neglect in stroke patients using virtual reality: a pilot study. *International Journal of Rehabilitation Research* 32(4), str. 280–286. DOI: [10.1097/MRR.0b013e3283013b1c](https://doi.org/10.1097/MRR.0b013e3283013b1c).
- Kappen D.L., Mirza-Babaei P., Nacke L.E. 2019. Older adults' physical activity and Exergames: a systematic review. *International Journal of Human-Computer Interact* 35(2), str. 140–167. DOI: [10.1080/10447318.2018.1441253](https://doi.org/10.1080/10447318.2018.1441253).
- Karamians R., Proffitt R., Kline D., Gauthier L.V. 2020. Effectiveness of Virtual Reality- and Gaming-Based Interventions for Upper Extremity Rehabilitation Poststroke: A Meta-analysis. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation* 101(5), DOI: 885–896. DOI: [10.1016/j.apmr.2019.10.195](https://doi.org/10.1016/j.apmr.2019.10.195).
- Karssemeijer E.G.A., Aaronson J.A., Bossers W.J., Smits T., Olde Rikkert M.G.M., Kessels R.P.C. 2017. Positive effects of combined cognitive and physical exercise training on cognitive function in older adults with mild cognitive impairment or dementia: A meta-analysis. *Ageing Research Review* 40, str. 75–83. DOI: [10.1016/j.arr.2017.09.003](https://doi.org/10.1016/j.arr.2017.09.003).
- Kato P.M., Cole S.W., Bradlyn A.S., Pollock B.H. 2008. A video game improves behavioral outcomes in adolescents and young adults with cancer: a randomized trial. *Pediatrics* 122(2), str. e305–e317. DOI: [10.1542/peds.2007-3134](https://doi.org/10.1542/peds.2007-3134).
- Katz N., Ring H., Naveh Y., Kizony R., Feintuch U., Weiss P.L. 2005. Interactive virtual environment training for safe street crossing of right hemisphere stroke patients with unilateral spatial neglect. *Disability and Rehabilitation* 27(20), str. 1235–1243. DOI: [10.1080/09638280500076079](https://doi.org/10.1080/09638280500076079).
- Keshner EA, Fung J. 2017. The quest to apply VR technology to rehabilitation: tribulations and treasures. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium & Orientation* 27(1), str. 1–5. DOI: [10.3233/VES-170610](https://doi.org/10.3233/VES-170610).
- Kim O., Pang Y., Kim J.H. 2019. The effectiveness of virtual reality for people with mild cognitive impairment or dementia: a meta-analysis. *BMC Psychiatry* 19(1), nr artykułu: 219. DOI: [10.1186/s12888-019-2180-x](https://doi.org/10.1186/s12888-019-2180-x).

- Kim W.S., Cho S., Park S.H., Lee J.Y., Kwon S., Paik N.J. 2018. A low cost kinect-based virtual rehabilitation system for inpatient rehabilitation of the upper limb in patients with subacute stroke: A randomized, double-blind, sham-controlled pilot trial. *Medicine* 97(25), e11173. DOI: [10.1097/MD.00000000000011173](https://doi.org/10.1097/MD.00000000000011173).
- Kistemaker D.A., Van Soest A.J., Wong J.D., Kurtzer I., Gribble P.L. 2013. Control of position and movement is simplified by combined muscle spindle and Golgi tendon organ feedback. *Journal of Neurophysiology* 109(4), str. 1126–1139. DOI: [10.1152/jn.00751.2012](https://doi.org/10.1152/jn.00751.2012).
- Kleim J.A., Jones T.A. 2008. Principles of experience-dependent neural plasticity: implications for rehabilitation after brain damage. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research* 51(1), str. S225–S239. DOI: [10.1044/1092-4388\(2008/018\)](https://doi.org/10.1044/1092-4388(2008/018)).
- Knoflach M., Matosevic B., Rücker M., Furtner M., Mair A., Wille G., Zangerle A., Werner P., Ferrari J., Schmidauer C., Seyfang L., Kiechl S., Willeit J., Austrian Stroke Unit Registry Collaborators. 2012. Functional recovery after ischemic stroke – a matter of age: data from the Austrian Stroke Unit Registry. *Neurology* 78(4), str. 279–285. DOI: [10.1212/WNL.0b013e31824367ab](https://doi.org/10.1212/WNL.0b013e31824367ab).
- Kokkinara E., Slater M. 2014. Measuring the effects through time of the influence of visuomotor and visuotactile synchronous stimulation on a virtual body ownership illusion. *Perception* 43(1), str. 43–58. DOI: [10.1068/p7545](https://doi.org/10.1068/p7545).
- Kostka J. 2017. Aktywność fizyczna uczestników Akademii Zdrowego starzenia w kontekście przebytych upadków. *Medycyna Sportowa* 1(4), str. 35–44. DOI: [10.5604/1232406X.1235632](https://doi.org/10.5604/1232406X.1235632).
- Krakauer J.W. 2006. Motor learning: its relevance to stroke recovery and neurorehabilitation. *Current Opinion in Neurology* 19(1), str. 84–90. DOI: [10.1097/01.wco.0000200544.29915.cc](https://doi.org/10.1097/01.wco.0000200544.29915.cc).
- Krichevets A.N., Sirotkina E.B., Yevsevicheva I.V., Zeldin L.M. 1995. Computer games as a means of movement rehabilitation. *Disability and Rehabilitation* 17(2), str. 100–105. DOI: [10.3109/09638289509166635](https://doi.org/10.3109/09638289509166635).
- Kruszyński M., Chabuda A., Wiśniowska J., Czerwosz L., Karwowska D. 2015. Komputerowy trening funkcji ruchowych i poznawczych w paradygmacie podwójnego zadania. *Ortopedia, Traumatologia, Rehabilitacja* 17(1), str. 56.
- Kwakkel G., Kollen B., Twisk J. 2006. Impact of time on improvement of outcome after stroke. *Stroke* 37(9), str. 2348–2353. DOI: [10.1161/01.STR.0000238594.91938.1e](https://doi.org/10.1161/01.STR.0000238594.91938.1e).
- Kwakkel G., Kollen B.J., Wagenaar R.C. 2002. Long term effects of intensity of upper and lower limb training after stroke: a randomised trial. *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry* 72(4), str. 473–479. DOI: [10.1136/jnnp.72.4.473](https://doi.org/10.1136/jnnp.72.4.473).
- Kwakkel G., van Peppen R., Wagenaar R.C., Wood Dauphinee S., Richards C., Ashburn A., Miller K., Lincoln N., Partridge C., Wellwood I., Langhorne P. 2004. Effects of augmented exercise therapy time after stroke: a meta-analysis. *Stroke* 35(11), str. 2529–2539. DOI: [10.1161/01.STR.0000143153.76460.7d](https://doi.org/10.1161/01.STR.0000143153.76460.7d).
- Landi F., Liperoti R., Russo A., Giovannini S., Tosato M., Capoluongo E., Bernabei R., Onder G. 2012. Sarcopenia as a risk factor for falls in elderly individuals: results from the iSIRENTE study. *Clinical Nutrition* 31(5), str. 652–658. DOI: [10.1016/j.clnu.2012.02.007](https://doi.org/10.1016/j.clnu.2012.02.007).
- Langhorne P., Bernhardt J., Kwakkel G. 2011. Stroke rehabilitation. *Lancet* 377(9778), str. 1693–1702. DOI: [10.1016/S0140-6736\(11\)60325-5](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(11)60325-5).
- Langhorne P., Wagenaar R., Partridge C. 1996. Physiotherapy after stroke: more is better? *Physiotherapy Research International: the Journal for Researchers and Clinicians in Physical Therapy* 1(2), str. 75–88. DOI: [10.1002/pri.6120010204](https://doi.org/10.1002/pri.6120010204).
- Laver K.E., Lange B., George S., Deutsch J.E., Saposnik G., Crotty M. 2017. Virtual reality for stroke rehabilitation. *The Cochrane Database of Systematic Reviews* 11(11), nr artykułu: CD008349. DOI: [10.1002/14651858.CD008349.pub4](https://doi.org/10.1002/14651858.CD008349.pub4).
- Lee K.H. 2015. Effects of a virtual reality-based exercise program on functional recovery in stroke patients: part 1. *Journal of Physical Therapy Science* 27(6), str. 1637–1640. DOI: [10.1589/jpts.27.1637](https://doi.org/10.1589/jpts.27.1637).
- Lee N.Y., Lee D.K., Song H.S. 2015. Effect of virtual reality dance exercise on the balance, activities of daily living, and depressive disorder status of Parkinson's disease patients. *Journal of Physical Therapy Science* 27(1), str. 145–147. DOI: [10.1589/jpts.27.145](https://doi.org/10.1589/jpts.27.145).
- Lehmann K.S., Ritz J.P., Maass H., Cakmak H.K., Kuehnepfel U.G., Germer C.T., Bretthauer G., Buhr H.J. 2005. A prospective randomized study to test the transfer of basic psychomotor skills from virtual reality

- to physical reality in a comparable training setting. *Annals of Surgery* 241(3), str. 442–449. DOI: [10.1097/01.sla.0000154552.89886.91](https://doi.org/10.1097/01.sla.0000154552.89886.91).
- Lei C., Sunzi K., Dai F., Liu X., Wang Y., Zhang B., He L., Ju M. 2019. Effects of virtual reality rehabilitation training on gait and balance in patients with Parkinson's disease: A systematic review. *PloS One* 14(11), nr artykułu: e0224819. DOI: [10.1371/journal.pone.0224819](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0224819).
- Levin M.F., Weiss P.L., Keshner E.A. 2015. Emergence of virtual reality as a tool for upper limb rehabilitation: incorporation of motor control and motor learning principles. *Physical Therapy* 95(3), str. 415–425. DOI: [10.2522/ptj.20130579](https://doi.org/10.2522/ptj.20130579).
- Lexell J., Brogårdh C. 2015. The use of ICF in the neurorehabilitation process. *NeuroRehabilitation* 36(1), str. 5–9. DOI: [10.3233/NRE-141184](https://doi.org/10.3233/NRE-141184).
- Li J., Erdt M., Chen L., Cao Y., Lee S.Q., Theng Y.L. 2018. The Social Effects of Exergames on Older Adults: Systematic Review and Metric Analysis. *Journal of Medical Internet Research* 20(6), nr artykułu: e10486. DOI: [10.2196/10486](https://doi.org/10.2196/10486).
- Li L., Yu F., Shi D., Shi J., Tian Z., Yang J., Wang X., Jiang Q. 2017. Application of virtual reality technology in clinical medicine. *American Journal of Translational Research* 9(9), str. 3867–3880.
- Liepert J. 2006. Motor cortex excitability in stroke before and after constraint-induced movement therapy. *Cognitive and Behavioral Neurology: official journal of the Society for Behavioral and Cognitive Neurology* 19(1), str. 41–47. DOI: [10.1097/00146965-200603000-00005](https://doi.org/10.1097/00146965-200603000-00005).
- Liepert J., Graef S., Uhde I., Leidner O., Weiller C. 2000. Training-induced changes of motor cortex representations in stroke patients. *Acta Neurologica Scandinavica* 101(5), str. 321–326. DOI: [10.1034/j.1600-0404.2000.90337a.x](https://doi.org/10.1034/j.1600-0404.2000.90337a.x).
- Liepert J., Hamzei F., Weiller C. 2004. Lesion-induced and training-induced brain reorganization. *Restorative Neurology and Neuroscience* 22(3–5), str. 269–277.
- Lohse K.R., Hilderman C.G., Cheung K.L., Tatla S., Van der Loos H.F. 2014. Virtual reality therapy for adults post-stroke: a systematic review and meta-analysis exploring virtual environments and commercial games in therapy. *PloS One* 9(3), nr artykułu: e93318. DOI: [10.1371/journal.pone.0093318](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0093318).
- Lorenz M., Brade J., Diamond L., Sjölie D., Busch M., Tscheligi M., Klimant P., Heyde C.E., Hammer N. 2018. Presence and User Experience in a Virtual Environment under the Influence of Ethanol: An Explorative Study. *Scientific Reports* 8(1), 6407. DOI: [10.1038/s41598-018-24453-5](https://doi.org/10.1038/s41598-018-24453-5).
- Lott A., Bisson E., Lajoie Y., McComas J., Sveistrup H. 2003. The effect of two types of virtual reality on voluntary center of pressure displacement. *Cyberpsychology and Behavior: the Impact of the Internet, Multimedia and Virtual Reality on Behavior and Society* 6(5), str. 477–485. DOI: [10.1089/109493103769710505](https://doi.org/10.1089/109493103769710505).
- Manera V., Chapoulie E., Bourgeois J., Guerchouche R., David R., Ondrej J., Drettakis G., Robert P. 2016. A Feasibility Study with Image-Based Rendered Virtual Reality in Patients with Mild Cognitive Impairment and Dementia. *PloS One* 11(3), nr artykułu: e0151487. DOI: [10.1371/journal.pone.0151487](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0151487).
- Mantovani E., Zucchella C., Bottiroli S., Federico A., Giugno R., Sandrini G., Chiamulera C., Tamburin S. 2020. Telemedicine and Virtual Reality for Cognitive Rehabilitation: A Roadmap for the COVID-19 Pandemic. *Frontiers in Neurology* 11, nr artykułu: 926. DOI: [10.3389/fneur.2020.00926](https://doi.org/10.3389/fneur.2020.00926).
- Marín-Morales J., Llinares C., Guixeres J., Alcañiz M. 2020. Emotion Recognition in Immersive Virtual Reality: From Statistics to Affective Computing. *Sensors* 20, nr artykułu: 5163. DOI: [10.3390/s20185163](https://doi.org/10.3390/s20185163).
- Massetti T., da Silva T.D., Crocetta T.B., Guarnieri R., de Freitas B.L., Bianchi Lopes P., Watson S., Tonks J., de Mello Monteiro C.B. 2018. The Clinical Utility of Virtual Reality in Neurorehabilitation: A Systematic Review. *Journal of Central Nervous System Disease* 10, 1179573518813541. DOI: [10.1177/1179573518813541](https://doi.org/10.1177/1179573518813541).
- Massetti T., Trevizan I.L., Arab C., Favero F.M., Ribeiro-Papa D.C., de Mello Monteiro C.B. 2016. Virtual reality in multiple sclerosis – A systematic review. *Multiple Sclerosis and Related Disorders* 8, str. 107–112. DOI: [10.1016/j.msard.2016.05.014](https://doi.org/10.1016/j.msard.2016.05.014).
- Mello Monteiro C.B., de, Massetti T., da Silva T.D., van der Kamp J., de Abreu L.C., Leone C., Savelsbergh G.J. 2014. Transfer of motor learning from virtual to natural environments in individuals with cerebral palsy. *Research in Developmental Disabilities* 35(10), str. 2430–2437. DOI: [10.1016/j.ridd.2014.06.006](https://doi.org/10.1016/j.ridd.2014.06.006).

- Merians A.S., Jack D., Boian R., Tremaine M., Burdea G.C., Adamovich S.V., Recce M., Poizner H. 2002. Virtual reality-augmented rehabilitation for patients following stroke. *Physical Therapy* 82(9), str. 898–915.
- Microsoft Azure. Dostępne online: <https://azure.microsoft.com/en-us/services/cognitive-services/speech-to-text/> (dostęp: 14.03.2022).
- Microsoft HoloLens. Dostępne online: <https://www.microsoft.com/pl-pl/hololens> (dostęp: 14.03.2022).
- Microsoft Xbox Controller. Dostępne online: <https://www.microsoft.com/en-us/store/collections/xboxcontrollers> (dostęp: 14.03.2022).
- Miguel-Rubio A., Rubio M.D., Salazar A., Moral-Munoz J.A., Requena F., Camacho R., Lucena-Anton D. 2020. Is Virtual Reality Effective for Balance Recovery in Patients with Spinal Cord Injury? A Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of Clinical Medicine* 9(9), nr artykułu: 2861. DOI: [10.3390/jcm9092861](https://doi.org/10.3390/jcm9092861).
- Mihelj M., Novak D., Milavec M., Zihel J., Olenšek A., Munih M. 2012. Virtual rehabilitation environment using principles of intrinsic motivation and game design. *Teleoperators and Virtual Environments* 21(1), str. 1–15. DOI: [10.1162/PRES_a_00078](https://doi.org/10.1162/PRES_a_00078).
- Milgram P., Takemura H., Utsumi A., Kishino F. 1995. Augmented reality: a class of displays on the reality-virtuality continuum. In *SPIE 2351 Telemanipulator and Telepresence Technologies*. DOI: [10.1117/12.197321](https://doi.org/10.1117/12.197321).
- Min K.B., Min J.Y. 2015. Health-related quality of life is associated with stroke deficits in older adults. *Age and Ageing* 44(4), str. 700–704. DOI: <https://doi.org/10.1093/ageing/afv060>.
- Molier B.I., Van Asseldonk E.H., Hermens H.J., Jannink M.J. 2010. Nature, timing, frequency and type of augmented feedback; does it influence motor relearning of the hemiparetic arm after stroke? A systematic review. *Disability and Rehabilitation* 32(22), str. 1799–1809. DOI: [10.3109/09638281003734359](https://doi.org/10.3109/09638281003734359).
- Morgan J.A., Corrigan F., Baune B.T. 2015. Effects of physical exercise on central nervous system functions: a review of brain region specific adaptations. *Journal of Molecular Psychiatry* 3(1), str. 3. DOI: [10.1186/s40303-015-0010-8](https://doi.org/10.1186/s40303-015-0010-8).
- Muratori L.M., Lamberg E.M., Quinn L., Duff S.V. 2013. Applying principles of motor learning and control to upper extremity rehabilitation. *Journal of Hand Therapy: Official Journal of the American Society of Hand Therapists* 26(2), str. 94–103. DOI: [10.1016/j.jht.2012.12.007](https://doi.org/10.1016/j.jht.2012.12.007).
- Nesbitt T.S., Hilty D.M., Kuenneth C.A., Siefkin A. 2000. Development of a telemedicine program: a review of 1,000 videoconferencing consultations. *The Western Journal of Medicine* 173(3), str. 169–174. DOI: [10.1136/ewj.173.3.169-a](https://doi.org/10.1136/ewj.173.3.169-a).
- Neuroforma PRO. Dostępne online: <https://www.neuroforma.pl/dla-placowek/> (dostęp: 04.05.2021).
- Neuroforma. Dostępne online: <https://www.neuroforma.pl> (dostęp: 04.05.2021).
- North M.M., North S.M., Coble J.R. 1997. Virtual reality therapy: an effective treatment for psychological disorders. *Studies in Health Technology and Informatics* 44, str. 59–70.
- Oculus Rift Accessories. Dostępne online: <https://www.oculus.com/rift/accessories/> (dostęp: 14.03.2022).
- Paliokas I., Kalamaras E., Votis K., Doumpoulakis S., Lakka E., Kotsani M., Freminet A., Benetos A., Ellul I., Polycarpou M., Zygouris S., Megalooikonomou V., Tzavaras D. 2020. Using a Virtual Reality Serious Game to Assess the Performance of Older Adults with Frailty. *Advances in Experimental Medicine and Biology* 1196, str. 127–139. DOI: [10.1007/978-3-030-32637-1_13](https://doi.org/10.1007/978-3-030-32637-1_13).
- Paszkowska M. 2020. Telerehabilitacja – wybrane aspekty prawne. *Praktyczna Fizjoterapia & Rehabilitacja* 6(117), str. 70–74.
- Petersen R.C. Clinical practice. Mild cognitive impairment. 2011. *The New England Journal of Medicine* 364(23), str. 2227–2234. DOI: [10.1056/NEJMc0910237](https://doi.org/10.1056/NEJMc0910237).
- Piercy K.L., Troiano R.P., Ballard R.M., Carlson S.A., Fulton J.E., Galuska D.A., George S.M., Olson R.D. 2018. The Physical Activity Guidelines for Americans. *JAMA* 320(19), str. 2020–2028. DOI: [10.1001/jama.2018.14854](https://doi.org/10.1001/jama.2018.14854).
- Polanowska K., Seniów J. 2005. Motoryczny wariant zespołu zaniedbywania jednostronnego w następstwie uszkodzenia mózgu. *Neurologia i Neurochirurgia Polska* 39(2), str. 141–149.
- Roosij I.J., de Port I.G., van de, Meijer J.G. 2016. Effect of Virtual Reality Training on Balance and Gait Ability in Patients With Stroke: Systematic Review and Meta-Analysis. *Physical Therapy* 96(12), str. 1905–1918. DOI: [10.2522/ptj.20160054](https://doi.org/10.2522/ptj.20160054).

- Robert P.H., König A., Amieva H., Andrieu S., Bremond F., Bullock R., Ceccaldi M., Dubois B., Gauthier S., Kenigsberg P.A., Nave S., Orgogozo J.M., Piano J., Benoit M., Touchon J., Vellas B., Yesavage J., Manera V. 2014. Recommendations for the use of Serious Games in people with Alzheimer's Disease, related disorders and frailty. *Frontiers in Aging Neuroscience* 6, nr artykułu: 54. DOI: [10.3389/fnagi.2014.00054](https://doi.org/10.3389/fnagi.2014.00054).
- Roby-Brami A., Feydy A., Combeaud M., Biryukova E.V., Bussel B., Levin M.F. 2003. Motor compensation and recovery for reaching in stroke patients. *Acta Neurologica Scandinavica* 107(5), str. 369–381. DOI: [10.1034/j.1600-0404.2003.00021.x](https://doi.org/10.1034/j.1600-0404.2003.00021.x).
- Rodrigues E.V., Gallo L.H., Guimarães A.T.B., Filho J.M., Luna B.C., Gomes A.R.S. 2018. Effects of Dance Exergaming on Depressive Symptoms, Fear of Falling, and Musculoskeletal Function in Fallers and Nonfallers Community-Dwelling Older Women. *Rejuvenation Research* 21(6), str. 518–526. DOI: [10.1089/rej.2017.2041](https://doi.org/10.1089/rej.2017.2041).
- Rose F.D., Attree E.A., Brooks B.M. 1997. Virtual environments in neuropsychological assessment and rehabilitation. *Studies in Health Technology and Informatics* 44, str. 147–155.
- Samsung Gear VR. Dostępne online: <https://www.samsung.com/global/galaxy/gear-vr/> (dostęp: 14.03.2022).
- Saposnik G., Cohen L.G., Mamdani M., Pooyania S., Ploughman M., Cheung D., Shaw J., Hall J., Nord P., Dukelow S., Nilanont Y., De los Rios F., Olmos L., Levin M., Teasell R., Cohen A., Thorpe K., Laupacis A., Bayley M. 2016. Efficacy and safety of non-immersive virtual reality exercising in stroke rehabilitation (EVREST): a randomised, multicentre, single-blind, controlled trial. *The Lancet. Neurology* 15(10), str. 1019–1027. DOI: [10.1016/S1474-4422\(16\)30121-1](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(16)30121-1).
- SeeMe Rehabilitacja. Dostępne online: <http://www.nowoczesna-rehabilitacja.com/produkty/seeme/czym-jest-seeme> (dostęp: 04.05.2021).
- Serino S., Barelo S., Miraglia F., Triberti S., Repetto C. 2017. Virtual Reality as a Potential Tool to Face Frailty Challenges. *Frontiers in Psychology* 8, nr artykułu: 1541. DOI: [10.3389/fpsyg.2017.01541](https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.01541).
- Shadmehr R. 2018. Motor Learning: A Cortical System for Adaptive Motor Control. *Current Biology* 28(14), str. R793–R795. DOI: [10.1016/j.cub.2018.05.071](https://doi.org/10.1016/j.cub.2018.05.071).
- Shea J.B., Morgan R.L. 1979. Contextual interference effects on the acquisition, retention, and transfer of a motor skill. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory* 5(2), str. 179–187. DOI: [10.1037/0278-7393.5.2.179](https://doi.org/10.1037/0278-7393.5.2.179).
- Shing C.Y., Fung C.P., Chuang T.Y., Penn I.W., Doong J.L. 2003. The study of auditory and haptic signals in a virtual reality-based hand rehabilitation system. *Robotica* 21, str. 211–218.
- Sirtori V., Corbetta D., Moja L., Gatti R. 2009. Constraint-induced movement therapy for upper extremities in stroke patients. *The Cochrane Database of Systematic Reviews* (4), nr artykułu: CD004433. DOI: [10.1002/14651858.CD004433.pub2](https://doi.org/10.1002/14651858.CD004433.pub2).
- Smith S.T., Sherrington C., Studenski S., Schoene D., Lord S.R. 2011. A novel Dance Dance Revolution (DDR) system for in-home training of stepping ability: basic parameters of system use by older adults. *British Journal of Sports Medicine* 45(5), str. 441–445. DOI: [10.1136/bjsm.2009.066845](https://doi.org/10.1136/bjsm.2009.066845).
- Stanney K.M., Kennedy R.S., Drexler J.M. 1997. Cybersickness is Not Simulator Sickness. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 41(2), str. 1138–1142. DOI: [10.1177/107118139704100292](https://doi.org/10.1177/107118139704100292).
- Stasieńko A., Sarzyńska-Długosz I. 2016. Virtual reality in neurorehabilitation. *Advances in Rehabilitation* 30(4), str. 67–75. DOI: [10.1515/rehab-2015-0056](https://doi.org/10.1515/rehab-2015-0056).
- Subramanian S.K., Levin M.F. 2011. Viewing medium affects arm motor performance in 3D virtual environments. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation* 8, 36. DOI: [10.1186/1743-0003-8-36](https://doi.org/10.1186/1743-0003-8-36).
- Subramanian S.K., Lourenço C.B., Chilingaryan G., Sveistrup H., Levin M.F. 2013. Arm motor recovery using a virtual reality intervention in chronic stroke: randomized control trial. *Neurorehabilitation and Neural Repair* 27(1), str. 13–23. DOI: [10.1177/1545968312449695](https://doi.org/10.1177/1545968312449695).
- Sutherland I.E. 1968. A Head-mounted Three Dimensional Display. W: *Proceedings of the Joint Computer Conference, Part I, AFIPS '68 (Fall, part I). December 9–11*, str. 757–764. DOI: [10.1145/1476589.1476686](https://doi.org/10.1145/1476589.1476686).
- Thilarajah S., Mentiplay B.F., Bower K.J., Tan D., Pua Y.H., Williams G., Koh G., Clark R.A. 2018. Factors Associated With Post-Stroke Physical Activity: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation* 99(9), str. 1876–1889. DOI: [10.1016/j.apmr.2017.09.117](https://doi.org/10.1016/j.apmr.2017.09.117).

- Tobii VR Eye-Tracking. Dostępne online: <https://vr.tobii.com/> (dostęp: 14.03.2022).
- Todorov E., Shadmehr R., Bizzi E. 1997. Augmented Feedback Presented in a Virtual Environment Accelerates Learning of a Difficult Motor Task. *Journal of Motor Behavior* 29(2), str. 147–158. DOI: [10.1080/00222899709600829](https://doi.org/10.1080/00222899709600829).
- Toomingas A., Hagberg M., Heiden M., Richter H., Westergren K.E., Tornqvist E.W. 2014. Risk factors, incidence and persistence of symptoms from the eyes among professional computer users. *Work* 47(3), str. 291–301. DOI: [10.3233/WOR-131778](https://doi.org/10.3233/WOR-131778).
- Torpil B., Şahin S., Pekçetin S., Uyanık M. 2020. The Effectiveness of a Virtual Reality-Based Intervention on Cognitive Functions in Older Adults with Mild Cognitive Impairment: A Single-Blind, Randomized Controlled Trial. *Games for Health Journal* 10(2), str. 109–114. DOI: [10.1089/g4h.2020.0086](https://doi.org/10.1089/g4h.2020.0086).
- Triegaardt J., Han T.S., Sada C., Sharma S., Sharma P. 2020. The role of virtual reality on outcomes in rehabilitation of Parkinson's disease: meta-analysis and systematic review in 1031 participants. *Neurological Sciences: Official Journal of the Italian Neurological Society and of the Italian Society of Clinical Neurophysiology* 41(3), str. 529–536. DOI: [10.1007/s10072-019-04144-3](https://doi.org/10.1007/s10072-019-04144-3).
- Türkbeş T.A., Kutlay S., Gök H. 2017. Clinical feasibility of Xbox Kinect™ training for stroke rehabilitation: A single-blind randomized controlled pilot study. *Journal of Rehabilitation Medicine* 49(1), str. 22–29. DOI: [10.2340/16501977-2183](https://doi.org/10.2340/16501977-2183).
- Turolla A., Rossetini G., Viceconti A., Palese A., Geri T. 2020. Musculoskeletal Physical Therapy During the COVID-19 Pandemic: Is Telerehabilitation the Answer? *Physical Therapy* 100(8), str. 1260–1264. DOI: [10.1093/ptj/pzaa093](https://doi.org/10.1093/ptj/pzaa093).
- Ultra-Leap. Dostępne online: <https://www.ultraleap.com/> (dostęp: 14.03.2022).
- VAST.Rehab. Dostępne online: <http://www.nowoczesna-rehabilitacja.com/produkty/seeme/czym-jest-seeme> (dostęp: 04.05.2021).
- Veerbeek J.M., van Wegen E., van Peppen R., van der Wees P.J., Hendriks E., Rietberg M., Kwakkel G. 2014. What is the evidence for physical therapy poststroke? A systematic review and meta-analysis. *PloS One* 9(2), nr artykułu: e87987. DOI: [10.1371/journal.pone.0087987](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0087987).
- Vert C., Nieuwenhuijsen M., Gascon M., Grellier J., Fleming L.E., White M.P., Rojas-Rueda D. 2019. Health Benefits of Physical Activity Related to an Urban Riverside Regeneration. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 16(3), nr artykułu: 462. DOI: [10.3390/ijerph16030462](https://doi.org/10.3390/ijerph16030462).
- Viau A., Feldman A.G., McFadyen B.J., Levin M.F. 2004. Reaching in reality and virtual reality: a comparison of movement kinematics in healthy subjects and in adults with hemiparesis. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* 1(1), nr artykułu: 11. DOI: [10.1186/1743-0003-1-11](https://doi.org/10.1186/1743-0003-1-11).
- Virtual Interactive Shopper. Dostępne online: <http://www.nowoczesna-rehabilitacja.com/produkty/seeme/czym-jest-seeme> (dostęp: 04.05.2021).
- Vive Facial Tracker. Dostępne online: <https://www.vive.com/eu/accessory/facial-tracker/> (dostęp: 14.03.2022).
- Vive Pro Eye. Dostępne online: <https://www.vive.com/uk/product/vive-pro-eye/overview/> (dostęp: 14.03.2022).
- Vovk A., Wild F., Guest W., Kuula T. 2018. Simulator Sickness in Augmented Reality Training Using the Microsoft HoloLens. Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. *Association for Computing Machinery*, str. 1–9. DOI: [10.1145/3173574.3173783](https://doi.org/10.1145/3173574.3173783).
- Waongenngarm P., Areerak K., Janwantanakul P. 2018. The effects of breaks on low back pain, discomfort, and work productivity in office workers: A systematic review of randomized and non-randomized controlled trials. *Applied Ergonomics* 68, str. 230–239. DOI: [10.1016/j.apergo.2017.12.003](https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.12.003).
- Warland A., Paraskevopoulos I., Tsekles E., Ryan J., Nowicky A., Griscti J., Levings H., Kilbride C. 2019. The feasibility, acceptability and preliminary efficacy of a low-cost, virtual-reality based, upper-limb stroke rehabilitation device: a mixed methods study. *Disability and Rehabilitation* 41(18), str. 2119–2134. DOI: [10.1080/09638288.2018.1459881](https://doi.org/10.1080/09638288.2018.1459881).
- Wilson P.N., Foreman N., Tlauka M. 1996. Transfer of spatial information from a virtual to a real environment in physically disabled children. *Disability and Rehabilitation* 18(12), str. 633–637. DOI: [10.3109/09638289609166328](https://doi.org/10.3109/09638289609166328).
- Wright D.L., Verwey W.B., Buchanan J., Chen J., Rhee J., Immink M.A. 2016. Consolidating behavioral and neurophysiological findings to explain the influence of contextual interference during motor

sequence learning. *Psychonomic Bulletin & Review* 23(1), str. 1–21.

DOI: [10.3758/s13423-015-0887-3](https://doi.org/10.3758/s13423-015-0887-3).

Zheng L., Li G., Wang X., Yin H., Jia Y., Leng M., Li H., Chen L. 2020. Effect of exergames on physical outcomes in frail elderly: a systematic review. *Aging Clinical and Experimental Research* 32(11), str. 2187–2200. [10.1007/s40520-019-01344-x](https://doi.org/10.1007/s40520-019-01344-x).

Zhu X., Yin S., Lang M., He R., Li J. 2016. The more the better? A meta-analysis on effects of combined cognitive and physical intervention on cognition in healthy older adults. *Ageing Research Reviews* 31, str. 67–79. DOI: [10.1016/j.arr.2016.07.003](https://doi.org/10.1016/j.arr.2016.07.003).

Zichermann G., Cunningham C. 2011. *Gamification by Design. Implementing Game Mechanics in Web and Mobile Apps*. O'Reilly Media, Sebastopol.

