

1.5. Nowoczesne technologie wspomagające neurorehabilitację

1.5.1. Innowacyjne zastosowanie szkieletów zewnętrznych (*exoskeletons*) w rehabilitacji neurologicznej

1.5.1.1. Wprowadzenie

Poprawa sprawności kończyn i stabilizacja tułowia to często najważniejsze cele nowoczesnej rehabilitacji neurologicznej. Jedną z najnowszych metod wspomagania usprawniania osób z zaburzeniami funkcji ruchowych jest zastosowanie szkieletów zewnętrznych, zwanych ostatnio w Polsce egzoszkieletami. W rehabilitacji neurologicznej znajdują one najczęściej zastosowanie u osób z niedowładami lub porażeniami kończyn górnych i dolnych, powstałymi w wyniku udaru mózgu, urazu czaszkowo-mózgowego, uszkodzenia rdzenia kręgowego, dziecięcego porażenia mózgowego, stwardnienia rozsianego, choroby Parkinsona i in.

Chociaż w ostatnich latach ukazał się szereg doniesień naukowych zawierających wyniki badań klinicznych i systematycznych przeglądów piśmiennictwa poświęconych skuteczności egzoszkieletów, to jednak wciąż istnieje potrzeba prowadzenia dalszych badań.

Zgodnie z encyklopedią Wikipedia słowo *exoskeleton* pochodzi od greckich słów „éxō” i „σκελετός”, co oznacza szkielet zewnętrzny, który podtrzymuje i chroni ciało zwierząt jak pancerz, w przeciwieństwie do wewnętrznego szkieletu (*endoskeleton*), występującego u kręgowców, w tym u człowieka. Przykładami zwierząt z egzoszkieletami są owady takie jak koniki polne i karaluchy oraz skorupiaki – kraby i homa-

Neurorehabilitacja

ry. Niektóre zwierzęta, takie jak żółw, wyposażone są zarówno w szkielet zewnętrzny, jak i wewnętrzny.

W literaturze *exoskeleton* występuje także pod innymi nazwami: zasilany pancerz, pancerz mocy, rama zewnętrzna, twarde ubranie, zewnętrzny kombinezon (ang. *powered armor, power armor, exoframe, hardsuit, exosuit*), napędzany silnikiem elektrycznym, pneumatyką, dźwigniami, hydrauliką lub kombinacją różnych technologii.

Najwcześniejszym egzozszkieletopodobnym urządzeniem był opracowany w 1890 roku w Rosji przez Nikołaja Jagina aparat wspomagający poruszanie się, wykorzystujący zbiornik ze sprężonym gazem. W 1917 roku amerykański wynalazca Leslie Kelley opatentował urządzenie zasilane parą wodną, działające niezależnie od ruchów użytkownika, które nazwał *pedomotor*.

Pierwszy prawdziwy szkielet zewnętrzny będący mobilną maszyną zintegrowaną z ruchami ludzkimi został opracowany w 1960 roku przez firmę General Electric i amerykańskie siły zbrojne. Zasilany hydraulicznie i elektrycznie *Hardiman* sprawiał, że podniesienie ciężaru rzędu 110 kg odczuwało się jak podnoszenie 4,5 kg. Ze względu na wysoką masę własną (680 kg) i niewielką prędkość poruszania się urządzenia (0,76 m/s) projekt nie powiódł się. Od tego czasu datuje się jednak szybki rozwój badań nad szkieletami zewnętrznymi, stymulowany głównie przez wyścig zbrojeń i technologie kosmiczne. Zauważono, że zapewniają one mniejsze zmęczenie i zwiększoną produktywność żołnierzy podczas rozładowywania materiałów eksploatacyjnych lub umożliwiają przenoszenie ciężkich przedmiotów (80-300 kg) podczas biegania lub wspinania się po schodach. Żołnierz może wówczas przebyć dłuższy dystans w krótszym czasie i z mniejszym wysiłkiem. Ze względu na wysokie koszty na badania nad egzozszkieletami mogą sobie pozwolić tylko kraje bogate. Tematyka sztucznych szkieletów zewnętrznych poruszana jest często w literaturze i filmach *science fiction* (SF) czy w grach komputerowych. W tym miejscu warto dodać, że Stanisław Lem w swoich futurologicznych powieściach przewidział powstanie robotów.

Prekursorem zastosowania szkieletów zewnętrznych w rehabilitacji był prof. Miomir Vukobratović z Instytutu Mihailo Pupina w Belgradzie. Wykonany pod jego kierunkiem prototyp aktywnego szkieletu zewnętrznego zasilanego pneumatycznie i sterowanego elektronicznie ZPM (*Zero Point Moment*) poddano testom w 1972 roku w Klinice Ortopedycznej w Belgradzie. Kolejny krok milowy postawił japoński naukowiec Yoshiyuki Sankai z Uniwersytetu Tsukuba, który podczas EXPO 2005 zaprezentował egzozszkielet nazwany HAL 5 (Hybrid Assistive Limb, piąta generacja), wykorzystujący EMG. Pod koniec XX i na początku XXI wieku powstał cały szereg urządzeń tego typu, dostępnych również komercyjnie. W piśmiennictwie można znaleźć następujące szkielety zewnętrzne (w kolejności alfabetycznej): ABLE, Amadeo, Ames Research Center experimental, ARGO, Armeo, ARM-Guide, AR-Min, Armon, Armor, ATLAS, AX-5 hard-shell space suit, Berkeley Lower Extremi-

ty Exoskeleton, Bi-Manu-Track, BLEEX, CAPIO Cyberdyne's, EKSO Bionics (bioniczne części ciała – sztuczne części ciała, zwłaszcza elektromechaniczne), eLeg, EXARM, ExoClimber, ExoHiker, Future Force Warrior, GENTLE/S, HAL (Hybrid Assistive Limb) 5 arms/legs, HIROB, Honda Exoskeleton Legs, HULC, INDEGO, I-TRAVLE, JPL, LIFESUIT, Lokomat, LOPES, ManBuZhe, Media Lab's Biomechanics Group legs, MIME (Mirror-Image Motion Enabler), MINA, MindWalker, MIT Manus, MoonWalker, MOTORICA, MULOS, NeRoBot, Parker Hannifin Indego Exoskeleton, RehaArm, Reharob, ReoGo, ReWalk, Rex Bionics Rex Exoskeleton, RoboKnee, RUPERT, Sarcos/Raytheon, String Robot, Tibion, UniExo, Vanderbilt LLE, Vector, VI Bot, Volketswil, WALL-X, WPAL, WPAS (Wearable Power Assist Suit), Wyss Institute Soft Exosuit, X-Arm-2.

1.5.1.2. Szkielety zewnętrzne stosowane w rehabilitacji neurologicznej

Egzoskielety znajdują coraz szersze zastosowanie w medycynie – jako pomoc dla osób niemogących poruszać się o własnych siłach, jak również dla personelu medycznego zajmującego się opieką nad osobami niepełnosprawnymi, ułatwiająca pielęgnację i przenoszenie pacjenta. Urządzenia te są jednymi z najbardziej nowoczesnych rozwiązań wspomagających osoby niepełnosprawne, wykorzystujących najnowsze zdobycze automatyki i robotyki. Próbując sklasyfikować egzoskielety, można zaliczyć je do robotów i aktywnych ortez (ortoz) mechanicznych.

Sztuczny egzoskielet lub pancerz wspomagający to mocowana na zewnątrz ciała powłoka, której celem jest wzmocnienie siły mięśni użytkownika, a czasem zastąpienie tej siły w całkowitych porażeniach. Egzoskielet może wzmacniać wszystkie partie mięśni lub tylko niektóre (np. sztuczne ramię – bioniczne). Projektanci muszą pokonać szereg problemów technicznych, takich jak m.in.: rodzaj materiału (najczęściej lekkie metale i plastik), ciężar urządzenia, sposób zasilania (źródło energii), rozmieszczenie czujników, dopasowanie do parametrów antropometrycznych użytkownika, jego możliwości, preferencji, naturalnych wzorców ruchowych i in. Stosowanie egzoskieletu musi być dla użytkownika wygodne i pozwalać na utrzymanie naturalnych dla niego pozycji. Komputer steruje wspomaganiami czynności użytkownika, takich jak: używanie kończyny górnej, siedzenie, stanie, wstawanie, chód, chodzenie po schodach, pochyłościach i nierównym terenie i in.

Sterowanie egzoskieletem, przewodowe lub bezprzewodowe, może się odbywać na cztery sposoby:

1. Sterowanie mechaniczne – gdy osoba jest częściowo sprawna i ma możliwość kontrolowania egzoskieletu manualnie, np. rękami za pomocą joysticka.
2. Sterowanie głosem – gdy osoba niepełnosprawna nie porusza się, ma jednak możliwość wypowiedzania komend głosowych, które są przesyłane poprzez mikrofon do komputera, a w nim odpowiednio interpretowane na odpowiadającą danemu

Neurorehabilitacja

zwrotowi funkcję egzoszkieletu, po czym z komputera wysyłana jest do sterownika egzoszkieletu odpowiednia seria instrukcji do wykonania (zadziałania odpowiednich siłowników) – np. odpowiadających czynnościom: podnieś rękę, wstań, idź itp.

3. Sterowanie czujnikami naskórnymi lub podskórnymi (implantami) – metoda polegająca na założeniu pacjentowi serii implantów, które, wzmacniając impulsy nerwowe, odczytują na ich podstawie intencje ruchowe osoby, a następnie przekazują te „intencje” (wzmocnione impulsy) do komputera sterującego. W przypadku tej metody wymagana jest częściowa sprawność układu nerwowego.
4. Sterowanie egzoszkieletem mogłoby się odbywać bezpośrednio z użyciem sygnałów bioelektrycznych z ośrodkowego układu nerwowego – po podłączeniu zestawu elektrod interfejsu mózg – komputer do głowy użytkownika egzoszkieletu sygnały odzwierciedlające zamiar ruchu byłyby przekazywane do sterownika egzoszkieletu, który na tej podstawie uruchamiałby odpowiednie jego funkcje. Mogłoby to umożliwić wykorzystanie egzoszkieletu osobom po uszkodzeniach rdzenia kręgowego, ale z zachowanymi funkcjami kory ruchowej mózgu oraz funkcjami poznawczymi umożliwiającymi bezpieczne (dla nich i otoczenia) korzystanie z egzoszkieletu. Wydaje się, że przyszłość sterowania egzoszkieletami należy do wykorzystania EMG i EEG.

Dla uproszczenia egzoszkielety dostępne na rynku można podzielić na trzy główne rodzaje:

1. poprawiające funkcję kończyny górnej,
2. wspomagające kończyny dolne,
3. wspomagające kończyny górne i dolne wraz z zapewnieniem stabilizacji tułowia.

1.5.1.2.1. Egzoszkielety wspomagające funkcję kończyny górnej

U osób z niedowładem połowicznym ograniczenie funkcji kończyny górnej występuje częściej niż niedowład kończyny dolnej. Według niektórych autorów zaburzenia funkcji kończyny górnej występują u 85% chorych po udarze mózgu. Dysfunkcja kończyny górnej po udarze mózgu jest spowodowana przez: niedowład, utratę indywidualnej kontroli stawów, spastyczność i nieprawidłową synergię. Ruchy kończyny często stają się nieprawidłowe, stereotypowe i asynergiczne, zakłócona jest także elastyczna koordynacja w stawie ramiennie-łopatkowym.

Terapia z użyciem egzoszkieletu, sterowanego komputerowo, zapewniającego odciążenie kończyny i wykonywanie samodzielnych ćwiczeń ze wzmocnionym sprzężeniem zwrotnym (ang. *biofeedback*), jest bardzo obiecującą i nowoczesną koncepcją usprawniania kończyny górnej u osób z niedowładem połowicznym. Metoda ta oparta jest na aktualnej wiedzy z zakresu neurofizjologii, w tym znajomości fizjologii sterowania ruchem. Wykorzystuje ona zjawiska (neuro)plastyczności mózgu, czyli jego zdolności do dostosowania się do zmienionych warunków poprzez

reorganizację, regenerację i tworzenie nowych połączeń synaptycznych między neuronami (ang. *sprouting*). Z najnowszych badań klinicznych wynika, że metody terapeutyczne oparte na aktywnym udziale pacjenta, o wysokiej intensywności, z treningiem ukierunkowanym zadaniowo i funkcjonalnie są bardziej skuteczne od metod tradycyjnych. Ćwiczenia te jednocześnie wspomagają zjawisko plastyczności mózgu.

Egzoszkielety kończyny górnej zapewniają trzy podstawowe właściwości: podparcie kończyny przeciwdziałające ciężeni powszechnemu, wzmocnione sprzężenie zwrotne poprzez powtarzające się zadania i system nagród (ang. *Augmented Feedback*) oraz narzędzia oceny (*Assessments Tools*), pozwalające na dokładne monitorowanie procesu poprawy i dokumentowanie go w komputerowej bazie danych. Równoważąc ciężar kończyny pacjenta, wspomagają zachowaną funkcję i kontrolę nerwowo-mięśniową oraz wspierają aktywne ruchy w trójwymiarowej przestrzeni roboczej (3D). Wrażliwy na ucisk uchwyt jest nie tylko urządzeniem wejściowym dla ćwiczeń, ale również interfejsem dla oprogramowania gier komputerowych, i pozwala na funkcjonalny trening rzeczywistych zadań życia codziennego (jak np. uniesienie szklanki, użycie długopisu itp.). Wśród zalet podkreśla się: motywujący charakter ćwiczeń, ich atrakcyjność (zastosowanie wirtualnej rzeczywistości) i możliwość wykonywania ćwiczeń w domu. Do mankamentów należy wysoka cena.

W piśmiennictwie naukowym ukazał się już szereg doniesień na temat skuteczności terapii z zastosowaniem egzoszkieleatów. Housman i wsp. na podstawie badania przeprowadzonego u 28 chorych z niedowładem połowicznym po udarze mózgu, u których zastosowano egzoszkieleat, stwierdzili, że ćwiczenia trójwymiarowe ze wsparciem masy ciała, z natychmiastową wizualizacją ruchu (sprzężeniem zwrotnym) i zastosowaniem wirtualnej rzeczywistości wykonywane przy pomocy robota T-Wrex były związane z dłuższą trwającą poprawą (w 6-miesięcznej obserwacji) w porównaniu z tradycyjnymi ćwiczeniami na blacie stołu. Kwakkel i wsp. przedstawili w 2008 roku systematyczny przegląd badań, opublikowanych do października 2006 roku, nad wpływem terapii wspomaganej robotem na odzyskanie ruchomości i czynności kończyny górnej u pacjentów po udarze mózgu. Do syntezy włączono 10 badań z udziałem 218 pacjentów. Badacze wskazali na znaczną różnorodność pomiędzy badaniami nad robotami dla dystalnej i proksymalnej części kończyny górnej. Skrytykowali zastosowanie w tych badań skal oceniających samodzielność w wykonywaniu czynności życia codziennego (ADL) zamiast walidowanych skal oceny funkcji kończyny górnej (np. skala Fugła-Meyer lub test ARAD). Prace wykazały znaczną poprawę funkcji motorycznych kończyny górnej po udarze mózgu po zastosowaniu robota. Nie stwierdzono znacznej poprawy funkcji codziennych (ADL). Przyszłe badania nad zastosowaniem robota powinny ich zdaniem wprowadzać rozróżnienie między górną i dolną częścią kończyny górnej i koncentrować się na analizie kinematycznej, w celu odróżnienia pomiędzy rzeczywistą poprawą

Neurorehabilitacja

ruchów i poprawą funkcji kończyny górnej uzyskaną dzięki zastosowaniu strategii kompensacyjnych kontroli proksymalnej tułowia i kończyny górnej.

Mehrholz i wsp. opublikowali w 2015 roku wyniki systematycznego przeglądu badań nad ćwiczeniami wspomaganyimi elektromechanicznie i przez roboty, wykorzystywanymi w celu poprawy funkcji kończyny górnej po udarze mózgu. Znalezione 34 badania spełniające wymagania, z udziałem 1160 uczestników. Jakość dowodów naukowych okazała się niska lub bardzo niska. Wspomaganie elektromechaniczne oraz przez robota nie zwiększało ryzyka zdarzeń niepożądanych. Wnioski autorów: u chorych po udarze korzystających z ćwiczeń wspomaganych elektromechanicznie i przy pomocy robota można liczyć na poprawę samodzielności w wykonywaniu czynności życia codziennego, funkcji kończyny górnej i siły mięśni rąk. Jednak wyniki te należy interpretować z dużą ostrożnością, ponieważ jakość dowodów naukowych była niska lub bardzo niska i zdarzyły się duże różnice w zakresie intensywności, czasu trwania i liczby ćwiczeń, rodzajów leczenia oraz charakterystyki chorych.

Kim i wsp. opublikowali najnowszy (2017) systematyczny przegląd doniesień dotyczących terapii z użyciem robotów wspomagających kończynę górną u pacjentów po udarze mózgu. Spośród 637 znalezionych artykułów jedynie sześć badań z udziałem 278 chorych spełniało wymagania. Przegląd potwierdził, że terapia wspomagana robotem w ruchu trójwymiarowym i wysoki stopień swobody ruchu miały pozytywny wpływ na odzyskanie czynności ruchowych kończyny górnej u pacjentów z udarem w okresie wczesnym.

Reasumując: terapia z użyciem egzoszkieletu sterowanego komputerowo, zapewniającego odciążenie kończyny górnej i wykonywanie samodzielnych ćwiczeń ze wzmocnionym sprzężeniem zwrotnym (*feedback*) jest bardzo obiecującą i nowoczesną koncepcją usprawniania kończyny górnej u osób z niedowładem połowicznym. Koncepcja ta stanowi innowacyjne rozwiązanie w zakresie usprawniania kończyny górnej stosowane w celu poprawy funkcji kończyny górnej i zwiększenia zaangażowania pacjenta w proces leczenia, umożliwiające wykonywanie zadań celowych w wirtualnej, trójwymiarowej przestrzeni. Ćwiczenia te wyzwalają plastyczność mózgu zależną od treningu (ang. *use-dependent plasticity*), co prowadzi do zapamiętania strategii adaptacyjnych, zaś prezentacja nagrania osoby wykonującej ćwiczenia wywołuje zmiany plastyczne w korze mózgowej obserwatora.

Bertani i wsp. (2017) na podstawie meta-analizy 17 publikacji stwierdzili przydatność wspomaganą przez roboty terapii w zakresie poprawy funkcji kończyny górnej po UM.

1.5.1.2.2. Egzoszkielety kończyn dolnych

Pierwsze egzoszkielety kończyn dolnych przeznaczone były dla osób z porażeniem obu kończyn dolnych (paraplegia), konstrukcje dedykowane osobom z porażeniem połowicznym pojawiły się później. Egzoszkielety te różnią się między sobą wieloma

cechami, w tym: masą, dopuszczalnym obciążeniem i zasilaniem (w przypadku zasilania baterią – maksymalnym czasem pracy). Stosowane są różne systemy sterowania, nauka chodzenia odbywa się na rampach, na bieżni ruchomej, w poręczach, rzadziej – na parkiecie i w terenie. W niektórych systemach stosuje się także dynamiczne odciążenie masy ciała i *biofeedback*. Wiele urządzeń umożliwia pacjentowi wstawanie, siadanie i stabilizację tułowia. Niektóre egzoszkielety umożliwiają wchodzenie na schody i schodzenie po nich. Komputer zazwyczaj pozwala zaprogramować wzorzec chodu pacjenta oraz określić prędkość i zakres ruchu dla stawów biodrowych i kolanowych. Wielkość siły zastosowanej przez pacjenta w trakcie chodu przez poszczególne segmenty kończyny dolnej (udo, podudzie) monitorowana jest za pomocą zestawu czujników umieszczonych w elementach systemu ortez. Informacja płynąca z czujników obrazuje na wyświetlaczu monitora zaangażowanie pacjenta w ćwiczenia, co daje możliwość zasadniczego sprzężenia zwrotnego (*biofeedback*). Odpowiednie oprogramowanie zapewnia pełną archiwizację przebiegu każdego treningu, w tym: prędkości, wydatku energetycznego, sztywności segmentów ciała podczas przemieszczania się, siły generowanej przez poszczególne segmenty ciała (udo, podudzie), zakresu ruchu poszczególnych segmentów ciała (udo, podudzie). Bezpieczeństwo pacjenta zapewnia wyłącznik bezpieczeństwa, reagujący w wypadku znacznego oporu, np. spowodowanego nadmierną spastycznością mięśni.

Federici i wsp. opublikowali w 2015 roku wyniki systematycznego przeglądu piśmiennictwa na temat wykorzystania zasilanych i aktywnych egzoszkieleatów kończyn dolnych przeznaczonych do ćwiczeń w paraplegii. Wśród 2046 prac znaleziono 27 badań spełniających wymagania, opublikowanych w latach 2001-2014, z udziałem 144 uczestników. Stwierdzono, że egzoszkieleaty są bezpieczną i praktyczną metodą wspomagania rehabilitacji, która nie jest fizycznie wyczerpująca i charakteryzuje się minimalnym zapotrzebowaniem na pamięć roboczą – łatwo się nauczyć korzystania ze szkieletu zewnętrznego. Egzoszkieleaty zwiększają mobilność, poprawiają funkcjonowanie i zmniejszają ryzyko wtórnych powikłań poprzez przywrócenie bardziej naturalnego wzorca chodu. Póki co brak eksperymentalnych metod badawczych, które umożliwiłyby porównanie skuteczności egzoszkieleatu z innymi technikami rehabilitacyjnymi.

Fishan i wsp. opublikowali wyniki badań nad skutecznością egzoszkieleatów stosowanych jako urządzenia pomocnicze lub rehabilitacyjne u pacjentów z niepełnym lub całkowitym uszkodzeniem rdzenia kręgowego, jakie ukazały się do 2 maja 2016 roku. Znaleziono dziewięć badań porównawczych opisanych w 11 publikacjach, z udziałem 300 pacjentów. Nie znaleziono ani jednego badania porównującego ćwiczenia z użyciem egzoszkieleatu z konwencjonalnymi ortezami (KAFO). Wnioski: do tej pory nie ma spójnych danych na temat korzyści z użycia szkieletu zewnętrznego w porównaniu z różnymi tradycyjnymi metodami usprawniania u pacjentów w okresie przewlekłym po uszkodzeniu rdzenia kręgowego. Potrzebne są testy porównujące egzoszkieleaty nowej generacji.

1.5.2. Zastosowanie technologii wirtualnej rzeczywistości (VR) w usprawnianiu kończyny górnej i chodu po udarze mózgu

1.5.2.1. Wprowadzenie

Szacuje się, że od 50% do 75% chorych pozostaje po udarze z trwałym ograniczeniem funkcji kończyny górnej lub zniesieniem czynności chwytnej ręki. Jednym z głównych celów rehabilitacji poudarowej u osób z niedowładem połowicznym jest poprawa funkcji kończyny górnej. Stąd szeroko zakrojone badania nad wypracowaniem nowych, skuteczniejszych metod usprawniania ręki. W XXI wieku do arsenału metod kompleksowego usprawniania doszła terapia z wykorzystaniem technologii wirtualnej rzeczywistości.

Według encyklopedii Wikipedia rzeczywistość wirtualna (ang. *virtual reality*, VR), fantomatyka (słownik języka polskiego PWN, termin utworzony przez Stanisława Lema), to „obraz sztucznej rzeczywistości stworzony przy wykorzystaniu technologii informatycznej. Polega na multimedialnym kreowaniu komputerowej wizji przedmiotów, przestrzeni i zdarzeń. Może on reprezentować zarówno elementy świata realnego (symulacje komputerowe), jak i zupełnie fikcyjnego (gry komputerowe *science fiction*)”. Prekursorem wirtualnej rzeczywistości był Myron Krueger (1969). Już w latach 70. XX wieku technologia ta znalazła zastosowanie komercyjne. Krueger jest także twórcą systemu powstałego w 1992 roku o nazwie CAVE (wirtualnej jaskini, ang. *cave automatic virtual environment*), w którym stereoskopowy obraz wyświetlany jest na ścianach i podłodze sześciennego pokoju.

W literaturze spotyka się prostą definicję rzeczywistości wirtualnej – trzy razy „i”: interakcja + immersja (zagłębienie) + imaginacja (wyobraźnia). Dzięki wirtualnej rzeczywistości istnieje możliwość symulowania swojej obecności zarówno w wirtualnym, jak i realnym świecie.

Obraz VR może być przekazany do danego użytkownika na dwa sposoby: za pomocą monitora lub przy użyciu specjalnych okularów – gogli. Wykorzystuje się do tego celu również ekrany wielkopowierzchniowe (w tym kinowe), a także projektory LCD oraz miniatury (umieszczane w specjalnie skonstruowanych „okularach”). Wszystkie te technologie umożliwiają wyświetlenie obrazu zarówno w trybie 2D, jak i trójwymiarowym 3D (stereoskopowo). Wymagany jest sprzęt wykrywający ruch pacjenta i dostarczający informacji zwrotnej (ang. *feedback*) z wykorzystaniem obrazu, dotyku i dźwięku. Są to czujniki ruchu, pozwalające pacjentowi na interakcję z konsolą/komputerem poprzez interfejs wykorzystujący gesty wykonywane przez kończyny i całe ciało, sterowany przez Kinect. Ruch wykrywany jest w trzech wymiarach w czasie rzeczywistym, poprzez syntezę danych pochodzących z przyspieszeniomierzy, żyroskopów i kamer 3D. Technologia rzeczywistości wirtualnej ma szerokie zastosowanie, również w medycynie, m.in. do nauczania me-

dycyny, interaktywnego szkolenia chirurgów, interaktywnych doświadczeń, a także w psychoterapii.

Obraz widziany przez pacjenta może być rzeczywisty lub wirtualny, zaś udział w sesji może odbywać się bezpośrednio lub za pomocą systemu *motion capture*.

Niektóre symulacje zawierają środowisko wirtualne z wirtualnymi artefaktami, które mogą być obsługiwane lub wchodzić w interakcje z użytkownikiem (najczęściej reprezentowanym przez awatara) poprzez różnego typu urządzenia wejścia-wyjścia. Najczęściej do tego celu służą: myszka komputerowa, klawiatura, dżojstik, *gamepad*, kierownica, tablet, *touchpad* lub ekran dotykowy. Bardziej futurystycznymi rozwiązaniami są: różnego rodzaju wirtualne rękawice, hełmy z czujnikami ruchu, kompletne kombinezony, fotele, a nawet całe kabiny symulacyjne. Odmianą VR jest rzeczywistość poszerzona (ang. *Augmented Reality*, AR), która łączy ze sobą świat wirtualny i prawdziwy. Przedmioty wirtualne w obrazie 3D są zintegrowane z trójwymiarowym (3D) środowiskiem rzeczywistym w czasie rzeczywistym. AR bazuje na kopiowaniu obrazu realnie istniejących osób, scenerii oraz zdarzeń i wprowadzaniu ich do świata rzeczywistości wirtualnej. Pacjent otrzymuje mieszaninę „klasycznych” ćwiczeń wykonywanych na sprzęcie dostępnym w szpitalu lub w domu z szeregiem ćwiczeń symulujących w środowisku VR (Azuma, 1997).

W 2009 roku powołano Międzynarodowe Towarzystwo Rehabilitacji Wirtualnej (ang. International Society for Virtual Rehabilitation, ISVR), którego zadaniem jest stworzenie platformy porozumienia i współpracy pomiędzy inżynierami, naukowcami i klinicystami zainteresowanymi wprowadzaniem nowych technologii w rehabilitacji ruchowej, psychologicznej, poznawczej i społecznej (www.isvr.org).

Pierwsze doniesienia dotyczące zastosowania VR w neurorehabilitacji ukazały się w połowie lat 90. XX wieku, pierwsze doniesienia dotyczące jej wykorzystania w rehabilitacji poudarowej datują się na początek pierwszej dekady XXI wieku, zaś pierwszy artykuł na temat zastosowania VR w usprawnianiu kończyny górnej został opublikowany w 2006 roku (Sanchez i wsp.). Od tego czasu liczba doniesień na ten temat rośnie lawinowo. Wirtualna rzeczywistość wydaje się dziś cennym uzupełnieniem kompleksowej rehabilitacji po udarze mózgu, zaś terapia wykorzystująca interakcję pacjenta z wirtualnym środowiskiem nie wymaga specjalistycznego, drogiego sprzętu.

1.5.2.2. Technologia wirtualnej rzeczywistości w celu usprawniania kończyny górnej po udarze

Ostatnie dziesięciolecie zaowocowało burzliwym wykorzystaniem wirtualnej rzeczywistości i interaktywnych gier wideo w usprawnianiu niedowładnej kończyny górnej u pacjentów po udarze mózgu. Zostało opublikowanych wiele doniesień na ten temat (Deutsch i wsp., 2004; Sviestrup, 2004; Broeren i wsp., 2008; Merians i wsp., 2009; Saposnik i wsp., 2010; Cho i wsp., 2012; Crosbie i wsp., 2012; Kwon i wsp.,

2012; Subramanian i wsp., 2013; Teasell i wsp., 2014; Mousavi Hondori i wsp., 2016), prezentujących różne rozwiązania techniczne, zwłaszcza rękawice wyposażone w czujniki wirtualne. Standen i wsp. (2015) wykazali, że gry wykorzystujące VR można także wykorzystać w domu do usprawniania kończyny górnej po udarze. Dzięki różnorodności zadań, obrazów i efektów, które mogą urozmaicić konwencjonalnie prowadzoną kinezyterapię, rehabilitacja z zastosowaniem wirtualnej rzeczywistości w większym stopniu angażuje pacjenta/pacjentkę oraz powoduje, iż ma on/ona motywację do systematycznych ćwiczeń. Większość dotąd wykonanych badań opisuje zastosowanie systemów VR w celu poprawy funkcji kończyny górnej w okresie sześciu miesięcy od wystąpienia udaru, jednak wciąż istnieje potrzeba prowadzenia dalszych badań z tego zakresu tematycznego. Stosuje się różne metody oceny funkcji kończyny górnej, najczęściej: Action Research Arm Test (ARAT), skalę Chedoke Arm and Hand Activity Inventory (CAHAI), skalę Fugła-Meyera, Motricity Index, skalę Wolfa (WMFT). Wykorzystanie VR pojawia się już w nowszych wytycznych dotyczących kompleksowego postępowania w udarze mózgu (Dawson i wsp., 2013; Billinger i wsp., 2014). Ukazały się doniesienia próbujące wyjaśnić wpływ VR na neuroplastyczność mózgu. Dohle i wsp. (2011), szukając reprezentacji korowej ruchów kończyny górnej, wykazali przy pomocy badania PET, że istotną rolę w pośrednictwie transformacji wzrokowo-motorycznej odgrywa przedklinek (*precuneus*), położony w płaciku ciemieniowym górnym.

Burnea (2003) wyliczył korzyści wynikające z zastosowania VR w medycynie i wyzwania stojące przed nią. Korzyści to: angażowanie i motywowanie pacjenta, ekonomia, powtarzalność, intensywność, dostosowanie do stanu pacjenta, możliwa do zastosowania także w fazie przewlekłej, zmniejszenie deficytów, poprawa funkcji, poprawa czynności dnia codziennego. Wyzwania: problemy w razie nieprawidłowej konfiguracji kończyn, dostępność głównie dla wyższej warstwy populacji, wymaga oswojenia personelu i pacjenta z techniką, akceptacja kliniczna, obciążenie funkcji poznawczych.

Henderson i wsp. w systematycznym przeglądzie literatury z 2007 roku stwierdzili, że obecne dowody na skuteczność stosowania VR w rehabilitacji kończyny górnej u pacjentów z udarem mózgu są ograniczone, ale wystarczająco zachęcające, aby uzasadnić prowadzenie dalszych badań dobrej jakości w tej populacji. Na podstawie przeanalizowanych publikacji wysnuli oni wniosek, że istnieją silne dowody sugerujące przewagę ćwiczeń w środowisku immersyjnym VR nad brakiem terapii i słabe dowody na przewagę immersyjnej VR nad leczeniem konwencjonalnym.

Monica Cameirão i jej wsp. opracowali w 2010 roku Rehabilitation Gaming System (RGS). Pacjent zaangażowany w RGS obserwuje kolorowe piłki zmierzające z daleka prosto na niego. Zadaniem osoby badanej jest przechwycić piłki wirtualną ręką, która jest przedłużeniem ramienia awatara sterowanego przez system *motion capture*. Szybkość, dystrybucja i rozmiar piłek mogą być dostosowywane do in-

dywidualnych zdolności pacjenta, co zapewnia trening indywidualny. Tak więc RGS polega na wzrokowo-ruchowym przetwarzaniu obrazu, które obejmuje obserwację ruchu, planowanie reakcji i zwrotne potwierdzenie udanej akcji (*feedback*). W ten sposób twórcy systemu potwierdzili istnienie tzw. neuronów lustrzanych, które przede wszystkim znajdują się w zakręcie czołowym dolnym oraz w płaciku ciemieniowym przednim dolnym. Teorię neuronów lustrzanych jako pierwsi opisali Rizzolatti i wsp. (1998) – są to grupy komórek nerwowych, które uaktywniają się podczas wykonywania pewnej czynności lub obserwowania jej u innych osobników.

Prochorow i wsp. (2013) na podstawie badania funkcjonalnego rezonansu jądrowego stwierdzili uaktywnianie się podczas RGS kory czołowej, ciemieniowej, skroniowej, obręczy i mózdzku. Zinterpretowali to jako potwierdzenie hipotezy mówiącej, że RGS angażuje mechanizmy lustrzane, mogące być wykorzystane do treningu wzrokowo-ruchowego.

Cameirão i wsp. (2012) w ciągu kilku lat rozwinęli swoją koncepcję RGS do trzech różnych technologii interfejsu. Są to:

- A. śledzenie ruchów barwnych znaczników umieszczonych na kończynach górnych i przenoszenie ich na kończyny wirtualne,
- B. RGS-Haptic, wykorzystujący zmysły dotyku i propriocepcji – dwa mechaniczne ramiona zapewniają wzmocnione sprzężenie zwrotne (*force feedback*) za pomocą dwóch uchwytów, które pacjent musi trzymać podczas treningu,
- C. dwa bierne egzoszkielety.

Turolla i wsp. (2013) przeprowadzili badania z udziałem 376 chorych, spośród których 74% rozpoczęło rehabilitację stacjonarną przed upływem 12 miesięcy od udaru. Pacjentów podzielono na dwie grupy: w pierwszej (n = 263) stosowano połączenie wirtualnej rzeczywistości (VR) z konwencjonalnymi metodami usprawniania kończyny górnej, druga to grupa kontrolna (n = 113) z terapią konwencjonalną. Program usprawniania składał się z 2 godzin terapii dziennie przez 5 dni w tygodniu, przez 4 tygodnie. W obu grupach nastąpiła znaczna poprawa w skali Fugla-Meyera (FM UE) i skali FIM, ale poprawa uzyskana w grupie z VR była znacznie większa niż uzyskana w grupie z terapią konwencjonalną.

Staiano i Flynn (2014) przeanalizowały 3960 artykułów naukowych dotyczących zastosowania aktywnych gier wideo w terapii. Spośród nich 64 doniesienia spełniły wymogi; w 11 opisano zastosowanie gier w rehabilitacji poudarowej. Gry te zastosowano po upływie od miesiąca do 15 lat po zachorowaniu. Pacjenci po udarze relacjonowali poprawę funkcji i zakresu ruchomości kończyny górnej, a także zgłaszali większą aktywność i poprawę czynności życia codziennego. Uczestnicy informowali, że gry były przyjemne, bezpieczne, łatwe w obsłudze i wciągające.

Lohse i wsp. (2014) przeprowadzili systematyczny przegląd bazy Cochrane dotyczący zastosowania wirtualnej rzeczywistości (VR) w terapii w populacji osób dorosłych (po 18. r.ż.) po udarze mózgu pod postacią niestandardowych systemów

środowisk wirtualnych (VE) i dostępnych na rynku systemów do gier wideo (CG). 26 badań spełniało kryteria włączenia, wśród nich 24 zawierały analizę ilościową: w 4 badaniach zastosowano CG (16,7%), w pozostałych 20 (83,3%) – VE. Wyniki odniesiono do trzech podstawowych parametrów klasyfikacji ICF: funkcji cielesnych (*bodily function*), aktywności na poziomie jednostki (*activity*) i uczestnictwa (*participation*). Stwierdzono znaczną poprawę funkcjonalną po terapii VR w porównaniu z konwencjonalnymi metodami terapii ($g = 0,48$, 95% CI = [0,27, 0,70]) i brak istotnej różnicy między VE i grami CG ($p = 0,38$). Co do wyników w kategorii aktywności, nie było znaczących korzyści z terapii VR ($G = 0,58$; 95% CI = [0,32, 0,85]), stwierdzono brak istotnej różnicy między VE i CG ($p = 0,66$). Co do wpływu VR na uczestnictwo, ogólny efekt był wielkości $G = 0,56$, 95% CI = [0,02, 1,10]. Wnioski autorów przeglądu: VR w rehabilitacji umiarkowanie poprawia wyniki w porównaniu z konwencjonalną terapią u dorosłych po udarze. Interwencji CG było zbyt mało, aby ocenić potencjalne korzyści wynikające z CG. Przyszłe badania w tej dziedzinie powinny dążyć do jasnego określenia terapii konwencjonalnej i sposobów oceny uczestnictwa. Zdaniem autorów należy wziąć pod uwagę motywacyjne składniki terapii oraz przeprowadzić duże badania z randomizacją dostępnych na rynku systemów CG.

Cenny wydaje się systematyczny przegląd bazy Cochrane pod kątem badań na temat wykorzystania VR u osób po udarze mózgu przedstawiony przez Lavera i wsp. w 2015 roku. Podstawowym celem tego przeglądu było określenie skuteczności wirtualnej rzeczywistości zastosowanej w celu poprawy funkcji kończyny górnej, oceniono również wpływ VR na poprawę lokomocji, funkcji poznawczych oraz samodzielności w wykonywaniu podstawowych czynności dnia codziennego. Ostatecznie po przeanalizowaniu 8244 publikacji w przeglądzie uwzględniono 37 prac spełniających wymogi badań randomizowanych lub z quasi-randomizacją wykonanych pomiędzy latami 2004 a 2014, z łączną liczbą 1019 uczestników – byli to pacjenci w wieku od 46 do 75 lat. Z oceny wykluczeni zostali chorzy z afazją, apraksją i zaburzeniami funkcji poznawczych. Czas, jaki upłynął od udaru, był bardzo zróżnicowany – od kilku dni do dziewięciu lat, przeważały prace obejmujące pierwsze miesiące po zachorowaniu. Stwierdzono znamienne wyższość wirtualnej rzeczywistości nad stosowanymi konwencjonalnymi metodami rehabilitacji stosowanej w celu poprawy funkcji kończyny górnej po udarze mózgu ([SMD] 0,28, 95% [CI] 0,08-0,49). Ponadto zastosowanie VR istotnie poprawiło samodzielność pacjentów w wykonywaniu czynności codziennych w porównaniu z tradycyjnymi sposobami leczenia (SMD 0,43 [95% CI 0,18-0,69]). Donoszono o rzadkich działaniach niepożądanych, były to m.in. zawroty i bóle głowy.

Sapospnik i współautorzy (2016) przeprowadzili badanie randomizowane, wielośrodkowe z pojedynczą ślepą próbą w ramach projektu EVEREST, w którym porównali dwie grupy pacjentów do trzech miesięcy po udarze mózgu ($n = 101$), u któ-

rych zastosowana została nieimmersyjna rzeczywistość wirtualna – system gier Nintendo Wii (n = 54) i tzw. aktywność rekreacyjna (n = 47). Pacjenci z obydwu grup poddani zostali 60-minutowym treningom trwającym przez dwa tygodnie (10 sesji). Zarówno po dwóch, jak i po czterech tygodniach od rozpoczęcia ćwiczeń kontrolne pomiary z wykorzystaniem skali Wolfa (WMFT) i skali Chedoke (CAHAI) wykazały, że osoby z grupy badanej (VR) charakteryzowały się podobnymi wynikami końcowymi jak w grupie kontrolnej. Badacze sugerują, że to nie rodzaj wykonywanej aktywności ma istotny wpływ na poprawę funkcji kończyny górnej, lecz raczej jej intensywność.

Piśmiennictwo

1. Azuma R.T., A Survey of Augmented Reality. „Teleoperators and Virtual Environments”, 1997; 6(4): 355-385.
2. Bertani R., Melegari C., De Cola M.C. et al., Effects of robot-assisted upper limb rehabilitation in stroke patients: a systematic review with meta-analysis. „Neurol Sci.”, 2017 May 24, doi: 10.1007/s10072-017-2995-5 [epub ahead of print].
3. Billinger S.A., Arena R., Bernhardt J. et al., Physical activity and exercise recommendations for stroke survivors: a statement for healthcare professionals from the American Heart Association/American Stroke Association. „Stroke”, 2014; 45: 2532-2553.
4. Bohil C.J., Alicea B., Biocca F.A., Virtual reality in neuroscience research and therapy. „Nature Reviews Neuroscience”, 2011; 12(12): 752-762.
5. Broeren J., Claesson L., Goude D. et al., Virtual rehabilitation in an activity centre for community-dwelling persons with stroke. The possibilities of 3-dimensional computer games. „Cerebrovasc Dis. ”, 2008; 26: 289-296.
6. Burdea G.C., Virtual rehabilitation – benefits and challenges. „Methods of Information in Medicine”, 2003; 42(5): 519-523.
7. Cameirão M.S., Badia S.B., Duarte E. et al., The Combined Impact of Virtual Reality Neurorehabilitation and Its Interfaces on Upper Extremity Functional Recovery in Patients With Chronic Stroke. „Stroke”, 2012; 43(10): 2720-2728.
8. Cameirão M.S., Badia S.B., Oller E.D., Verschure P.F., Neurorehabilitation using the virtual reality-based Rehabilitation Gaming System: methodology, design, psychometrics, usability and validation. „J. Neuroeng. Rehabil.”, 2010; 7: 48-61.
9. Cho K., Yu J., Jung J., Effects of virtual reality-based rehabilitation on upper extremity function and visual perception in stroke patients: a randomized control trial. „J. Phys. Ther. Sci.”, 2012; 24: 1205-1208.
10. Crosbie J.H., Lennon S., McGoldrick M.C. et al., Virtual reality in the rehabilitation of the arm after hemiplegic stroke: a randomized controlled pilot study. „Clin. Rehabil.”, 2012; 26: 798-806.
11. Dawson A.S., Knox J., McClure A. et al., Stroke rehabilitation 2013. Stroke Best Practice Working Group, http://strokebestpractices.ca/wp-content/uploads/2013/07/SBP2013_Stroke-Rehabilitation-Update_July-10_FINAL.pdf, 2013.
12. Deutsch J.E., Merians A.S., Adamovich S. et al., Development and application of virtual reality technology to improve hand use and gait of individuals post-stroke. „Restorative Neurology Neuroscience”, 2002; 20: 1-16.
13. Dohle C., Stephan K.M., Valvoda J.T. et al., Representation of virtual arm movements in precuneus. „Exp. Brain Res.” 2011; 208(4): 543-555.

14. Federici S., Meloni F., Bracalenti M., De Filippis M.L., The effectiveness of powered, active lower limb exoskeletons in neurorehabilitation: A systematic review. „NeuroRehabilitation”, 2015; 37(3): 321-340.
15. Fisahn C., Aach M., Jansen O. et al., 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 J.”, 2016; 6(8): 822-841.
16. Henderson A., Korner-Bitensky N., Levin M., Virtual reality in stroke rehabilitation: a systematic review of its effectiveness for upper limb motor recovery. „Top Stroke Rehabil. ”, 2007 14(2): 52-56.
17. Holden M.K., Virtual environments for motor rehabilitation: review. „Cyberpsychol. Behav.”, 2005; 8: 187-211.
18. Housman S.J., Scott K.M., Reinkensmeyer D.J., A randomized controlled trial of gravity-supported, computer-enhanced arm exercise for individuals with severe hemiparesis. „Neurorehabil. Neural Repair”, 2009; 23(5): 505-514.
19. Kim G., Lim S., Kim H. et al., Is robot-assisted therapy effective in upper extremity recovery in early stage stroke? A systematic literature review. „J. Phys. Ther. Sci.”, 2017, 29(6): 1108-1112.
20. Kwakkel G., Kollen B.J., Krebs H.J., Effects of robot-assisted therapy on upper limb recovery after stroke: A systematic review. „Neurorehabil. Neural Repair”, 2008; 22(2): 111-121.
21. Kwon J.S., Park M.J., Yoon I.J., Park S.H., Effects of virtual reality on upper extremity function and activities of daily living performance in acute stroke: a double-blind randomized clinical trial. „NeuroRehabilitation”, 2012; 31: 379-385.
22. Laver K., George S., Thomas S. et al., Cochrane review: virtual reality for stroke rehabilitation. „European J. Physical Rehabilitation Medicine”, 2015; 48(3): 523-530.
23. Lohse K.R., Hilderman C.G.E., Cheung K.L. et al., Virtual reality therapy for adults post-stroke: a systematic review and meta-analysis exploring virtual environments and commercial games in therapy. „PloS ONE”, 2014; 2014.
24. Mehrholz J., Elsner B., Werner C. et al., Electromechanical-assisted training for walking after stroke: updated evidence. „Stroke”, 2013; 44(10): e127-e136.
25. Mehrholz J., Pohl M., Platz T. et al., Electromechanical and robot-assisted arm training for improving activities of daily living, arm function, and arm muscle strength after stroke. „Cochrane Database Syst. Rev.”, 2015; (11): CD006876.
26. Merians A.S., Tunik E., Adamovich S.V., Virtual reality to maximize function for hand and arm rehabilitation: exploration of neural mechanisms. „Stud. Health Technol. Inform.”, 2009; 145: 109-125.
27. Mirelman A., Bonato P., Deutsch J.E., Effects of training with a robot-virtual reality system compared with a robot alone on the gait of individuals after stroke. „Stroke”, 2008; 40: 169-174.
28. Mousavi Hondori H., Khademi M., Dodakian L. et al., Choice of human-computer interaction mode in stroke rehabilitation. „Neurorehabil Neural Repair”, 2016; 30: 258-265.
29. Opara J., Rycerski W., Szczygieł J. i wsp., Innowacyjne zastosowanie wirtualnej rzeczywistości w unowocześnianiu terapii lustrzanej w niedowładzie kończyny górnej. „Rehabilitacja w Praktyce”, 2016; 4: 43-46.
30. Saposnik G., Levin M., Outcome Research Canada Working Group, Virtual reality in stroke rehabilitation: a meta-analysis and implications for clinicians. „Stroke”, 2011; 42: 1380-1386.
31. Saposnik G., Teasell R., Mamdani M. et al., Effectiveness of virtual reality using Wii gaming technology in stroke rehabilitation: a pilot randomized clinical trial and proof of principle. „Stroke”, 2010; 41: 1477-1484.

32. Staiano A.E., Flynn R., Therapeutic uses of active videogames: A systematic review. „Games for Health J.”, 2014; 3(6): 351-365.
33. Standen P.J., Threapleton K., Connell L. et al., A study to evaluate a low cost virtual reality system for home based rehabilitation of the upper limb following stroke. „Phys. Ther.”, 2015; 95: 350-359.
34. Subramanian S.K., Lourenco C.B., Chilingaryan G. et al., Arm motor recovery using a virtual reality intervention in chronic stroke: randomized control trial. „Neurorehabil. Neural Repair”, 2013; 13(27): 13-23.
35. Sviestrup H., Motor Rehabilitation Using Virtual Reality. „J. Neuroegr. Rehab.”, 2014; 1(1): 10.
36. Takahashi C.D., Der-Yeghiaian L., Le V. et al., Robot-based hand motor therapy after stroke. „Brain”, 2008; 131: 425-438.
37. Teasell R., Rice D., Richardson M. et al., The next revolution in stroke care. „Expert Rev. Neurother”, 2014; 14: 1307-1314.
38. Turolla A., Dam M., Ventura L. et al., Virtual reality for the rehabilitation of the upper limb motor function after stroke: a prospective controlled trial. „J. NeuroEngineering Rehabil.”, 2013; 10: 85-93.