

OGRANICZENIA ROBOTÓW REHABILITACYJNYCH

Limitations of rehabilitation robots

Emilia Mikołajewska^{1,2}, Dariusz Mikołajewski^{2,3}

¹ Katedra Fizjoterapii, Wydział Nauk o Zdrowiu, Collegium Medicum w Bydgoszczy, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu

² Laboratorium Neurokognitywne, Interdyscyplinarne Centrum Nowoczesnych Technologii, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu

³ Instytut Mechaniki i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy

adres do korespondencji: e.mikolajewska@wp.pl

STRESZCZENIE

Roboty rehabilitacyjne są uważane za efektywne rozwiązanie w terapii deficytów motorycznych, lecz ograniczenie ich możliwości usprawniania czynności wykorzystywanych w rzeczywistym otoczeniu ciągle istnieje. Poprawa tej sytuacji może być osiągnięta dzięki uatrakcyjnieniu środowiska treningowego, podejściu rozwiązującemu kompleksowo problemy funkcjonalne, poprawie uczenia motorycznego, stymulację neuroplastyczności układu nerwowego, motywację sterowaną sprzężeniem zwrotnym oraz większe zaangażowanie w zadania funkcjonalne. Nowe strategie opisane w artykule pomogą przybliżyć bieżące ograniczenia robotów rehabilitacyjnych oraz próby ich przezwyciężenia.

Słowa kluczowe: rehabilitacja, fizjoterapia, terapia wspomagana robotem.

SUMMARY

Rehabilitation robots are perceived effective in reducing motor deficits but limitations of their ability to improve real world functions still exist. Improvements may be achieved by attractive training environment, complex motor problem solving approach, improved motor learning, nervous system neuroplasticity stimulation, feedback-controlled motivation and better functional task engagement. Novel strategies described in this article help familiarize with current limitations of rehabilitation robots and attempts to overcome them.

Key words: rehabilitation, physiotherapy, robot-assisted therapy.

WSTĘP

Aspekt techniczny wytwarzania urządzeń techniki medycznej dotyczy zaprojektowania produktu zaspokajającego jasno sprecyzowane wymagania użytkownika medycznego, w tym:

- zadane cechy użytkowe, geometryczne i własności,
- prawidłowe współdziałanie w ramach istniejących lub nowo opracowanych procedur klinicznych,
- wykonanie z materiałów o wymaganych własnościach fizyko-chemicznych i technologicznych,
- oczekiwaną trwałość produktu przy prawidłowej eksploatacji i serwisowaniu,
- odpowiedni poziom automatyzacji, komputerowego wspomagania i analizy danych,
- najmniejszych możliwych kosztów.

Dotyczy to również robotów rehabilitacyjnych. Niniejsza praca ma na celu analizę ograniczeń klinicznych i konstrukcyjnych robotów rehabilitacyjnych oraz przedstawienie prób ich przezwyciężenia.

WYMAGANIA KLINICZNE

Potencjalne obszary zastosowań klinicznych robotów rehabilitacyjnych są ogromne, szczególnie w rehabilitacji długoterminowej. Dla przykładu według badań przeprowadzonych w USA wśród pacjentów 6 miesięcy po udarze:

- 50% (powyżej 65 r.ż.) ma niedowład,
- 30% nie jest w stanie chodzić,
- 26% nie jest samodzielnych w czynnościach codziennego życia (*activities of daily living* – ADLs) [1].

Powoduje to znaczne zapotrzebowanie zarówno na specjalistyczny personel medyczny, opiekunów oraz sprzęt (w tym zaopatrzenia rehabilitacyjnego) niezbędny nie tylko do prowadzenia dalszej terapii, ale wręcz do normalnego funkcjonowania. Przesuwanie części usług rehabilitacji długoterminowej do telerehabilitacji (np. w Polsce: w ramach telerehabilitacji kardiologicznej), wzrost zapotrzebowania na rehabilitację geriatryczną dodatkowo będą stymulowały tą dziedzinę w nadchodzących latach.

Zasadniczym wymogiem klinicznym w rehabilitacji jest przywrócenie pacjenta do pełnej sprawności, a jeśli to niemożliwe,

to do maksymalnej dostępnej sprawności (w części przypadków: dalsza rehabilitacja umożliwia utrzymanie tak osiągniętej sprawności). Na zakończenie rehabilitacji pacjent powinien być maksymalnie samodzielny i niezależny od pomocy innych osób (ale może korzystać ze sprzętu zaopatrzenia rehabilitacyjnego, tj. wózków, lasek, kul, ortez itp.), a wykonanie pożądanego ruchu nie powinno odbiegać od wzorców fizjologicznych, być np. zbyt wolne, męczące i/lub denerwujące dla pacjenta. Zatem ostatecznym celem rehabilitacji jest tu poprawa jakości życia pacjentów przez wsparcie i rozszerzenie ich zdolności motorycznych¹.

Obecnie wykorzystuje się następujące rozwiązania z zakresu robotyki rehabilitacyjnej:

- 1) stacjonarne roboty rehabilitacyjne:
 - do rehabilitacji funkcji kończyn dolnych i chodu: Lokomat, ReoAmbulator,
 - do rehabilitacji funkcji kończyn górnych, w tym palców dłoni: Armeo, ReoGo;
- 2) mobilne roboty rehabilitacyjne (czterokończynowe lub tylko na kończyny dolne):
 - egzoskielety medyczne: HAL5, ReWalk, eLegs [2],
 - inne: zrobotyzowane wózki dla osób niepełnosprawnych (iBot4000, TankChair) [3], neuroprotezy i nanoroboty.

Ze względu na różnorodność usprawnianych funkcji nieco inne będą wymagania dotyczące robotów do usprawniania kończyn górnych (np. w zakresie precyzji i dynamiki chwytu oraz dopasowania siły chwytu do realizowanego zadania funkcjonalnego, kształtu chwytanego przedmiotu itp.).

Podstawowe wymagania kliniczne dotyczące robotów rehabilitacyjnych są następujące:

- elastyczność;
- powtarzalność;
- mierzalność i rozliczalność, w tym szerokie możliwości analizy wyników, badanie adaptacji funkcjonalnej (po uszkodzeniu itp.), zapewnienie obiektywnych pomiarów zmian kontroli motorycznej w czasie;
- półautonomiczne wykonywanie zadań terapeutycznych;

¹ Obecnie roboty rehabilitacyjne, z małymi wyjątkami (np. foka Paro dla dzieci), znajdują zastosowanie w rehabilitacji ruchowej.

- możliwość realizacji szerokiej gamy zadań: od prostych ruchów w przestrzeni dwuwymiarowej (punkt-punkt), przez ruchy w przestrzeni trójwymiarowej, aż po złożone sekwencje ruchów niezbędne do realizacji w rzeczywistym świecie zadań funkcjonalnych typu „posmaruj masłem kromkę chleba”;
- możliwość efektywniejszego (bardziej fizjologicznego, stabilniejszego, płynniejszego, z mniejszym zmęczeniem itp.) wykonania ruchu ze wsparciem robota niż bez niego;
- możliwość zaplanowania zindywidualizowanej i adaptacyjnej rehabilitacji w liczbie co najmniej 5 sesji terapeutycznych na tydzień przez co najmniej 4–8 tygodni;
- bezpieczeństwo operatora i pacjenta (systemy awaryjne), niezawodność i łatwość utrzymania w czystości [1];
- zbadanie krótko- i długoterminowych skutków użytkowania robotów rehabilitacyjnych, w ramach randomizowanych prób klinicznych zgodnie z paradygmatem Medycyny Opartej na Faktach (ang. *Evidence Based Medicine* – EBM).

Dodatkowe wymagania w stosunku do urządzeń mobilnych:

- zwiększenie mobilności użytkownika/pacjenta w stosunku do rozwiązań dotychczas stosowanych, w tym w zakresie pokonywania przeszkód naturalnych i sztucznych (np. możliwość rezygnacji z wind i podjazdów);
- wsparcie wykonywania czynności codziennego życia (ubieranie się, toaleta, przygotowywanie posiłków, przemieszczanie się) oraz nauki i pracy;
- realizacja rehabilitacji tylko kończyn dolnych, tylko kończyn górnych lub jednocześnie dolnych i górnych w ruchu;
- wsparcie (np. przez automatyczne częściowe odciążenie, zwiększenie siły lub zastąpienie funkcji) pacjentów osłabionych, po amputacjach lub z uszkodzeniami układu nerwowego;
- zmniejszenie zmęczenia;
- możliwość długiego wykorzystywania (nawet do 14 godzin na dobę) bez szkodliwych zmian wtórnych (np. odleżyn);
- bezpieczeństwo operatora i pacjenta, również w ramach telerehabilitacji [4].

W związku z koniecznością spełnienia ww. wymagań zostały zidentyfikowane następujące ograniczenia robotów rehabilitacyjnych:

- ograniczone zrozumienie neuroplastyczności układu nerwowego, motorycznego uczenia się w ramach powrotu do zdrowia oraz współczesnych metod rehabilitacyjnych u inżynierów, przy niedostatecznej liczbie interdyscyplinarnych projektów badawczych, angażujących jednocześnie inżynierów robotyków, inżynierów biomedycznych, lekarzy różnych specjalności, fizjoterapeutów, terapeutów zajęciowych, kognitywistów, psychologów, (neuro)fizjologów i biomechaników [1];
- silna zależność efektów terapii od rodzaju i stopnia deficytu oraz lokalizacji uszkodzenia;
- szereg możliwych istotnych klinicznie zależności, np. między wiekiem pacjenta, stosowanymi metodami chirurgicznymi i farmakologicznymi a wynikami leczenia;
- tzw. *target-area specific therapy*, tzn. konieczność oddziaływania robotem oddzielnie na poszczególne części ciała, co jest szczególnie kłopotliwe np. przy kończynie górnej, gdzie najpierw trzeba usprawnić staw barkowy, łokciowy, nadgarstkowy, stawy palców, wzmocnić siłę mięśniową i poprawić koordynację, żeby móc przejść dalej do bardziej złożonych zadań – powoduje to oderwanie ćwiczeń wykonywanych za pomocą robota od zadań ruchowych występujących w normalnym życiu – być może szersze użycie egzoskieletów w rehabilitacji pozwoli na zmniejszenie tego ograniczenia;
- używanie głównie ćwiczeń powtarzalnych (ang. *repetitive exercises, repetitive training*), które jest szeroko dyskutowane, gdyż uważa się, że proste ruchy lub ćwiczenia pasywne nie prowadzą do pełnego wyzdrowienia;
- brak badań nad skutkami ubocznymi wykorzystania robotów rehabilitacyjnych [2];
- brak jednolitej metodologii badań z wykorzystaniem robotów rehabilitacyjnych, np. z podziałem na pacjentów w sta-

nach ostrych i chronicznych, dorosłych i dzieci itd.;

- brak standardów i wytycznych klinicznych do kierowania na rehabilitację z wykorzystaniem robotów oraz jej prowadzenia uwzględniając stan funkcjonalny, potrzeby i możliwości pacjenta.

Neuroplastyczność kompensacyjna, czyli funkcjonalna reorganizacja kory mózgu w ramach rehabilitacji i motorycznego powrotu do zdrowia, powinna następować w rezultacie terapii kładącej nacisk na wykorzystanie również kończyny uszkodzonej (po udarze: porażonej) oraz odzyskiwania utraconych wzorców motorycznych lub, przy braku takiej możliwości, wypracowania zupełnie nowych wzorców w ich miejsce. Aby to osiągnąć, oprócz intensywnego, wielokrotnego powtarzania ruchów, konieczne jest wykorzystanie otoczenia bogatego w bodźce, różnorodnych zadań ruchowych ukierunkowanych na wykorzystanie ich w czynnościach życia codziennego (np. odkręcanie butelki i nalewanie płynu z butelki do szklanki) oraz silnej stymulacji podwyższającej motywację pacjenta (biofeedback, rzeczywistość wirtualna, interfejsy haptyczne, gry, próby z serwisami społecznościowymi) [1]. Co więcej, różne zadania motoryczne mają różną wagę i znaczenie dla różnych użytkowników. Na indywidualizację wpływają również osobnicze zdolności neuroplastyczne, adaptacja, nabyte doświadczeniem procesy minimalizacji błędów predykcji kolejnego ruchu i jego parametrów, nabyte (w tym: wymuszone) wzorce zachowania. Podobnie zadania funkcjonalne wymagające znacznej siły różnią się od zadań wymagających dużej dokładności i inaczej należy je doskonalić [5]. Są to mechanizmy wykraczające poza dotychczasowe rozumienie motorycznego powrotu do zdrowia i stymulacji neuroplastyczności mózgu, wymagające często dużego doświadczenia od fizjoterapeuty, indywidualnego podejścia do oceny funkcjonalnej oraz do stawiania celów terapeutycznych [5, 6].

Wymienione ograniczenia powodują, że roboty rehabilitacyjne sprawdzają się w rehabilitacji ortopedycznej, kardiologicznej i geriatrycznej, ale w rehabilitacji neurologicznej w znacznej części przypadków mogą służyć jedynie jako efektywna wspomagająca metoda rehabilitacyjna. Konieczne jest wypracowanie nowych strategii w tym obszarze, szczególnie w odniesieniu do pacjentów po udarze, którzy często wymagają wielomiesięcznej czy nawet wieloletniej rehabilitacji, często bez gwarancji efektu. Jednym z ciekawych rozwiązań są badania nad połączeniem terapii zrobotyzowanej z metodą NDT-Bobath [1], jako jednej z najważniejszych metod w rehabilitacji pacjentów z deficytami neurologicznymi.

TECHNICZNE I TECHNOLOGICZNE WŁAŚCIWOŚCI ROBOTÓW REHABILITACYJNYCH

Roboty rehabilitacyjne określają następujące parametry i charakterystyczne właściwości:

- konkretne przeznaczenie kliniczne;
- skalowalność, czyli dostosowanie do możliwości i potrzeb różnych placówek służby zdrowia (np. produktów lub rozwiązań modułowych, rozbudowywanych o kolejne moduły w ramach rodziny) – tu również wymiary, waga itp. poszczególnych wersji, ale również dostępność ćwiczeń w odciążeniu czy możliwość skorzystania z ćwiczeń przez pacjenta na wózku;
- wyposażanie robotów w urządzenia diagnostyczne, w tym oferujące ocenę możliwości układu ruchu oraz układu nerwowego, monitorujące postępy pacjenta oraz jego potencjał do dalszej terapii;
- łatwe sterowanie;
- niskie zużycie energii;
- cicha praca;
- łatwe utrzymanie i długą żywotność;
- bezpieczeństwo pacjenta i operatora;
- dodatkowo: wpisywanie się w obowiązujące standardy rehabilitacji, efektywność udowodniona badaniami naukowymi i publikacjami oraz akceptacja AOTM.

Stopień komplikacji zadań związanych z konstrukcją robota rehabilitacyjnego jest bardzo wysoki, np. ręka ludzka składa się

z 18 członów, 17 połączeń ruchomych, 66 mięśni, ma 22 stopnie swobody i 23 stopnie ruchomości, przy czym najmniejsze elementy (palce) mają 3 lub 4 stopnie swobody, realizują przy tym dwie główne funkcje: wysięgnikową (ramię, przedramię) i manipulacyjną (śródręcze, palce dłoni) [7, 8]. Każde uproszczenie w tym zakresie może zmniejszyć efektywność rehabilitacji, stąd rzadko spotykane są roboty mogące zapewnić usprawnienie wszystkich funkcji kończyny górnej. Do rozwiązania jest zatem szereg problemów zarówno na poziomie samej konstrukcji elementów robota, jak i jego układów sterowania.

Obecnie rozwiązania konstrukcyjne robotów rehabilitacyjnych obejmują przede wszystkim:

- roboty do usprawniania funkcji kończyn górnych (włącznie z funkcjami palców dłoni lub bez nich);
- roboty do usprawniania funkcji kończyn dolnych (w tym do re-edukacji chodu);
- egzoskielety jako wielofunkcyjne roboty rehabilitacyjne na kończyny dolne lub czterokończynowe (na kończyny dolne i górne).

Aspekty techniczne robotów rehabilitacyjnych są niezwykle złożone. Obejmują one przede wszystkim:

- 1) kwestie podstawowe: koncepcje i możliwości wykorzystania techniki medycznej (tu: rozwiązań robotyki, automatyki medycznej) w zastosowaniach klinicznych z uwzględnieniem ww. wymagań klinicznych na roboty rehabilitacyjne;
- 2) układ kinematyczny, napęd i zasilanie;
- 3) biokompatybilność i higienę technologii medycznych, bezpieczeństwo, jakość (normy, procedury dopuszczenia przez Agencję Oceny Technologii Medycznych itd.);
- 4) w zakresie budowy: uwzględnienie anatomii i biomechaniki człowieka;
- 5) w zakresie sterowania: uwzględnienie (neuro)fizjologii człowieka², neuronauk obliczeniowych (ang. *computational neurosciences*) oraz najnowszych badań z rehabilitacji i fizjoterapii, a także możliwości modyfikacji algorytmów sterujących w miarę postępu ww. nauk;
- 6) relacje człowiek-maszyna i wynikowe interfejsy HMI (ang. *human-machine interface*) w zakresie:
 - komunikacji (werbalnej, niewerbalnej, emocji),
 - działania robota a podziału uprawnień i odpowiedzialności pomiędzy operatora i maszynę;
- 7) aspekty etyczne i prawne;
- 8) użyteczność i relacja jakość/cena.

Zasadnicze wymagania w zakresie sprzętu można sformułować następująco:

- nastawienie na kompleksowe usprawnianie: od prostych ruchów aż po złożone czynności funkcjonalne, być może również z wykorzystaniem elementów rzeczywistego otoczenia (od małych przedmiotów, jak kubki czy łyżeczki, aż po całe pomieszczenia, klatki schodowe i tory przeszkód – dla rozwiązań mobilnych) w ramach systemów rzeczywistości rozszerzonej (ang. *augmented reality* – AR)³;
- możliwość ćwiczenia czynności wymagających skoordynowanego użycia obu stron ciała, np. chwytu oburęcznego słoika w celu odkręcenia nakrętki;
- możliwość ćwiczenia dynamicznej koordynacji czasowo-przestrzennej całego ciała, np. chodu, wchodzenia na schody itp. w częściowym indywidualnie dobranym obciążeniu oraz z wykorzystaniem sprzętu zaopatrzenia rehabilitacyjnego;
- wykorzystanie robotów rehabilitacyjnych wpisuje się w proces terapeutyczny, którego rezultatem jest kompleksowe rozwiązanie problemów pacjenta, problemów nie jedynie poddanych terapii robotem rehabilitacyjnym, stąd konieczność synchronizacji i koordynacji planu terapii robotem

z innymi oddziaływaniami w ramach postępowania terapeutycznego.

Zasadnicze wymagania w zakresie systemów sterowania i stowarzyszonego oprogramowania można sformułować następująco:

- 1) rozwój oprogramowania sterującego robotami rehabilitacyjnymi oraz oferującego szersze możliwości przetwarzania danych, w tym wnioskowania klinicznego i podpowiedzi (tzw. drugiej opinii);
- 2) indywidualnie skrojone oprogramowanie (ang. *custom-made software*) uwzględniające specyfikę jednostki służby zdrowia, wykorzystywanych metod terapeutycznych, celów i preferencji pacjenta itd.;
- 3) sterowanie z wykorzystaniem informacji pochodzących od czujników elektromiograficznych (EMG), żyroskopowych czujników położenia, czujników siły nacisku na podłoże (lub stopnia dynamicznego obciążenia), czujników przyspieszenia, czujników kątów zgięcia stawów kończyn a przyszłościowo: interfejsów mózg-komputer;
- 4) problem optymalizacji siły rozwiązywany, np. z wykorzystaniem metody Bogey'a i wsp. [9];
- 5) problem potencjalnej redukcji siły człowieka w układzie człowiek-maszyna;
- 6) zapotrzebowanie na oprogramowanie utrzymujące/podnoszące motywację u pacjentów usprawnianych w ramach telerehabilitacji, jak również podnoszące wiedzę ich i ich rodzin/opiekunów;
- 7) wzrost znaczenia modeli obliczeniowych w rehabilitacji, szczególnie w zakresie:
 - planowania i różnicowania trajektorii ruchu funkcjonalnego,
 - analizy składowych złożonych ruchów funkcjonalnych (takich jak sekwencja: podniesienie kubka od ust, picie do zaspokojenia pragnienia, odstawienie kubka na stół),
 - analizy oceny poprawności ruchu przez pacjenta (naturalnego feedbacku, np. wzrokowego i dotykowego) oraz próba stworzenia feedbacku sztucznego dla osób np. z zaburzeniami czucia,
 - prób automatyzacji określenia czynników wpływających na uznanie danego wzorca ruchu za efektywny lub optymalny,
 - realizacji procesorów mięśniowych (ang. *my processor*) jako modeli czasu rzeczywistego każdego z mięśni objętych wspomaganie, w oparciu m.in. o modele mięśni według Hilla (ang. *Hill phenomenological muscle model*).

Dopasowanie robota do indywidualnego użytkownika może ułatwić fakt, że każdy pacjent dysponuje dość ograniczonym zasobem naturalnych lub zbliżonych do naturalnych wzorców ruchu, które dość łatwo wychwycić np. za pomocą klinicznej analizy chodu u zdrowego człowieka, trudniej jednak je zdefiniować u pacjenta bez możliwości wykonania poprawnego (np. w pełnym zakresie) ruchu.

Rozsądne korzystanie z dostępnych rozwiązań w dziedzinie robotyki rehabilitacyjnej wymaga nie tylko identyfikacji potrzeb i potencjału w tym zakresie, ale również dopasowania rozwiązań do modelu pacjenta i jego deficytów.

Robot rehabilitacyjny jako sprawne narzędzie o dużej samodzielności oraz sztucznej inteligencji jeszcze długo nie będzie dostępny. Obecnie wykorzystywane rozwiązania w większości przypadków wymagają zarówno stałej obecności, jak i ciągłego nadzoru nad ich działaniem ze strony fizjoterapeuty. Sztuczna inteligencja robota rehabilitacyjnego, pojmowana tu jako pożądana cecha zbliżona do zachowania człowieka w danej sytuacji (por. test Turinga), nie jest póki co wymagana. Możliwość komunikowania się nie jest tu czynnikiem krytycznym, chodzi raczej o elastyczny i bezpieczny program dostosowujący się w czasie rzeczywistym do parametrów realizowanego zadania [10].

Interfejs haptyczny robota rehabilitacyjnego nie tylko wzbogaca sensoryczne sprzężenie zwrotne (biofeedback), ale może również dodawać nowe cechy fizyczne do wykonywanego

² Por. złożoność kości, mięśni i ścięgien kończyny górnej, konieczność oddania ich naturalnego współdziałania, koordynacji torów ruchów i przykładanych sił oraz reakcji chwytanych/dotykanych obiektów.

³ Raczej anegdotyczny wyzwanie dla inżynierów jest egzoskielet czterokończynowy (ze wsparciem funkcji palców dłoni) pozwalający użytkownikowi z pełnym wspomaganie zawiązać w kucnięciu sznurówadła.

przez pacjenta zadania funkcjonalnego, wpływając na poprawę efektywności rehabilitacji i większe zbliżenie zadania do odpowiednika naturalnego. Zaczyna to być prawdziwa wielomodalna (oprócz wzrokowej i dźwiękowej – również biomechaniczna i neuromięśniowa) interakcja ze sztucznym środowiskiem w ramach wirtualnej rzeczywistości (ang. *virtual reality* – por. system do usprawniania kończyny górnej z feedbackiem dotykowym/haptycznym NJIT-RAV) [11].

W opozycji do ww. rozszerzania biofeedbacku stoi przekonanie, że zarówno feedback wzrokowy jako zwrotna informacja o błędzie lub jego braku jest wystarczający do realizacji znacznej części adaptacyjnych zadań motorycznych, w tym wymagających oceny przyłożonej siły, bez wykorzystania biofeedbacku haptycznego czy też proprioceptywnego (czucia głębokiego). Wymagało to oczywiście pewnego czasu na adaptację, niemniej jednak taka kompensacja pokazuje ogromne, często jeszcze nie w pełni zbadane, możliwości kompensacyjne ludzkiego organizmu [12].

Nowością są neuroroboty współpracujące z neuroprotezami jako integralne części ciała pacjenta [13, 14]. Ten kierunek badań wymaga zupełnie odrębnego artykułu, choć badania na temat neuroprotez kończyn dolnych i górnych (w tym o pięciu palcach) są prowadzone od dość dawna. Rozwiązania te oparte

są na interfejsach mózg-komputer (ang. *brain-computer interface* – BCI) oraz urządzeniach sterowanych za ich pomocą.

Przedstawiony w pracy obraz pokazuje robotykę rehabilitacyjną na progu swoich możliwości, obciążoną nie tylko dużymi oczekiwaniami i aspiracjami, ale również niedostatkiem badań teoretycznych i praktycznych. Wydaje się, że znaczna część omówionych tu ograniczeń może w dość krótkim czasie zostać rozwiązana, niemniej jednak musi wzrosnąć liczba badań w tym zakresie, w tym badań krajowych lub międzynarodowych z udziałem polskich naukowców.

WNIOSKI

Wykorzystanie robotów rehabilitacyjnych napotyka na szereg ograniczeń technicznych, medycznych, etycznych i prawnych. Specyfika zastosowań (materiałem oddziaływania robota jest żywy człowiek) powoduje, że aspekt techniczny jest jedynie równie istotny jak rozważania społeczne, ekonomiczne, etyczne czy prawne. Niezbędny jest stały postęp oraz opracowywanie nowych rozwiązań, umożliwiających pacjentom np. powrót do nauki i/lub pracy.

Źródło finansowania: Praca sfinansowana ze środków własnych autorów.

Konflikt interesów: Autorzy nie zgłaszają konfliktu interesów.

BIBLIOGRAFIA

1. Johnson MJ. Recent trends in robot-assisted therapy environments to improve real-life functional performance after stroke. *J Neuro Eng Rehabil* 2006; 3: 29.
2. Mikołajewska E, Mikołajewski D. Poruszanie się człowieka w egzoszkielecie – aspekty antropometryczne. *Antropomotoryka* 2012; 22(57): 115–121 (art. w jęz. ang.).
3. Braga RA, Petry M, Reis LP, et al. IntellWheels: modular development platform for intelligent wheelchairs. *J Rehabil Res Dev* 2011; 48(9): 1061–1076.
4. Mikołajewska E, Mikołajewski D. *Neurorehabilitacja XXI wieku. Techniki teleinformatyczne*. Kraków: Oficyna Wydawnicza „Impuls”; 2011.
5. Krakauer JW, Mazzoni P. Human sensorimotor learning: adaptation, skill, and beyond. *Curr Opin Neurobiol* 2011; 21(4): 636–644.
6. Goble DJ, Anguera JA. Plastic changes in hand proprioception following force-field motor learning. *J Neurophysiol* 2010; 104(3): 1213–1215.
7. Dindorf R. Rozwój zaopatrzenia ortopedycznego z elementami płynowymi. *Pomiary Automatyka Robotyka* 2004; 6: 4–9.
8. Mianowski K. Wyniki wstępnych badań chwytaka wielopalczaste go z podatnością do inteligentnej manipulacji z czuciem. *Pomiary Automatyka Robotyka* 2011; 15(5): 42–45.
9. Bogey RA, Perry J, Gitter AJ. An EMG-to-force processing approach for determining ankle muscle forces during normal human gait. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng* 2005; 13(3): 302–310.
10. Kramme R, Hoffmann K-P, Pozos RS, eds. *Springer handbook of medical technology*. New York–Heidelberg: Springer; 2012.
11. Merians AS, Fluet GG, Qiu Q, et al. Learning in a virtual environment using haptic systems for movement re-education: can this medium be used for remodeling other behaviors and actions? *J Diabetes Sci Technol* 2011; 5(2): 301–318.
12. Melendez-Calderon A, Masia L, Gassert R, et al. Force field adaptation can be learned using vision in the absence of proprioceptive error. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng* 2011; 19(3): 298–306.
13. Moreno JC, Del Ama AJ, de Los Reyes-Guzmán A, et al. Neurobotic and hybrid management of lower limb motor disorders: a review. *Med Biol Eng Comput* 2011; 49(10): 1119–1130.
14. Mikołajewska E, Mikołajewski D. Neuroprostheses for increasing disabled patients' mobility and control. *Adv Clin Exp Med* 2012; 21(2): 263–272.

Adres do korespondencji:

Dr Emilia Mikołajewska
Katedra Fizjoterapii
Wydział Nauk o Zdrowiu
Collegium Medicum im. Ludwika Rydygiera
ul. Jagiellońska 13–15
85-067 Bydgoszcz
Tel.: 52 585 34 64
E-mail: e.mikolajewska@wp.pl

Praca wpłynęła do Redakcji: 28.08.2016 r.

Po recenzji: 21.09.2016 r.

Zaakceptowano do druku: 24.09.2016 r.