

**Emilia Mikołajewska**

10 Wojskowy Szpital Kliniczny z Polikliniką SP ZOZ w Bydgoszczy

**Dariusz Mikołajewski**

Uniwersytet Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy

Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu

# Wykorzystanie robotów rehabilitacyjnych do usprawniania

## Streszczenie

Nauki medyczne oraz praktyka kliniczna coraz częściej sięgają po najnowsze rozwiązania techniczne rozszerzające możliwości terapii oraz podwyższające jej efektywność. We współczesnej rehabilitacji za jedno z takich rozwiązań uważa się wykorzystanie robotów do usprawniania pacjentów. Artykuł ma na celu przedyskutowanie możliwości zastosowań klinicznych oraz ocenę możliwych kierunków rozwoju robotyki.

**Słowa kluczowe:** rehabilitacja, fizjoterapia, robot rehabilitacyjny

## Usage of robotic rehabilitation for improvement

### Summary

Medical sciences and clinical practice are increasingly turning to the latest technology expanding treatment options, and increasing its efficiency. In modern rehabilitation, usage of robots to improve patients is considered as one of such solutions. The aim of this paper is to discuss the possibility of clinical application and evaluation of the possible development directions of robotics.

**Keywords:** rehabilitation, physiotherapy, rehabilitation robot

## Wprowadzenie

Za robota rehabilitacyjnego uważa się praktycznie każdą reprogramowalną, elastyczną platformę, umożliwiającą fizyczną interakcję robota z pacjentem oraz manipulację przez robota elementami ciała pacjenta w celach terapeutycznych (ang. *robot mediated therapy*). Zatem do robotów rehabilitacyjnych w ścisłym znaczeniu tego pojęcia będą należały roboty stacjonarne, egzoszkielety oraz niektóre roboty wykorzystywane w telerehabilitacji, ale nie będą się do nich zaliczały roboty terapeutyczne, oddziałujące tylko na zdolności poznawcze i samopoczucie pacjenta oraz roboty służące wyłącznie poprawie komunikacji, uczenia się, diagnostyki czy samoobsługi. Wątpliwości są w stanie budzić bardzo zaawansowane protezy robotyczne (konstrukcyjnie i funkcjonalnie mogące nie różnić się np. od elementów egzoszkieleatów), które być może z czasem uzupełnią klasyfikację robotów rehabilitacyjnych.

Badania naukowe z zakresu robotyki medycznej rozwijają się dynamicznie, jednak nie znajduje to odzwierciedlenia w publikacjach. Baza danych robotyki medycznej *Medical Robotics*

*Database* (MERODA1) wykazuje 46 projektów z obszaru robotyki rehabilitacyjnej, co stanowi 10,09% wszystkich projektów w niej zawartych (rejestracja tam jest dobrowolna). Przegląd głównych baz bibliograficznych, zawierających prace z dziedziny fizjoterapii i rehabilitacji (PubMed, PEDro, CINAHL, *Health Source: Nursing/Academic Edition*) z użyciem słów kluczowych „rehabilitation robot”, „rehabilitation” + „robot”, przyniósł 633 artykuły opublikowane w latach 1985–2013, w tym 74 prace przeglądowe, 56 randomizowanych prób klinicznych, 16 opisów przypadków oraz całkowity brak wytycznych klinicznych. Artykuły z omawianego zakresu stanowiły jedynie 0,19% wszystkich prac z zakresu rehabilitacji (337 215) oraz 9,66% prac z zakresu robotyki (6 551), wykazywanych we wspomnianych bazach. Niemniej jednak zbiór prac systematycznie się rozszerza: stosunek liczby prac nt. robotów rehabilitacyjnych, opublikowanych w 2012 r. (104) do opublikowanych w 2002 r. (7) wyniósł ponad 14:1. Mała ilość badań klinicznych, szczególnie randomizowanych, oraz brak wytycznych w omawianym zakresie utrudnia szerokie wykorzystanie kliniczne robotów rehabilitacyjnych jako efektywnej metody terapeutycznej. Pomimo powyższych faktów, nie ulega wątpliwości, że wykorzystanie robotów w usprawnianiu stanowi element nowoczesnej rehabilitacji. Należy jednak zauważyć, że obecnie z klinicznego punktu widzenia takie ich wykorzystanie stanowi najczęściej uzupełniającą formę terapii. Nie zmienia to, mimo wszystko, faktu, że wraz z rozwojem techniki (w tym systemów sterowania robotów rehabilitacyjnych) sytuacja ta będzie się poprawiać.

Celem niniejszej pracy jest analiza publikacji z zakresu robotyki rehabilitacyjnej oraz przedstawienie najbardziej perspektywicznych kierunków jej rozwoju.

## Podstawy terapii wspomaganej robotami

Zaburzenia funkcji chodu są dość częstym wynikiem deficytów, w tym neurologicznych, a jednocześnie niezwykle poważnie wpływają na poruszanie się pacjenta, a co za tym idzie, możliwość: wykonywania codziennych czynności, udziału w życiu społecznym, rozrywki, nauki i pracy. W reedukacji chodu stosowane są (m.in.):

- ortozy wspierające pracę/funkcję kończyn dolnych,
- proste narzędzia odciążające,
- systemy odciążające, ułatwiające pracę w przypadku niedowładów,
- roboty rehabilitacyjne, w tym egzoszkielety.

Reedukacja chodu w bardzo wielu przypadkach musi być wsparta:

- kinezyterapią,
- metodami kinezyterapeutycznymi,
- fizykoterapią, w tym funkcjonalną stymulacją elektryczną (ang. *functional electrical stimulation* – FES) – wykorzystującą pobudzenie mięśni jako naturalnych efektorów, dającą korzyści praktyczne, ale również szybsze zmęczenie mięśni oraz słabszą kontrolę trajektorii ruchu.

<sup>1</sup> <http://www.umm.uni-heidelberg.de/apps/ortho/meroda/>, [data pobrania: 05.06.2013]

Wykorzystanie robotów rehabilitacyjnych, w tym tych najnowocześniejszych, stanowi obecnie kluczowy element usprawniania funkcji chodu. Powodem tego jest fakt, że tradycyjna reedukacja chodu, wykonana przez terapeutę, wymaga zaangażowania wielu fizjoterapeutów, co jest kosztowne, czasochłonne i energochłonne. Panuje ogólny pogląd, że największą korzyść w zakresie usprawniania chodu uda się osiągnąć za pomocą egzoszkieleatów. Przemawia za tym:

- łatwość użycia, w tym w ramach rehabilitacji i opieki domowej,
- możliwość wykorzystania ich niemal we wszystkich codziennych czynnościach, w naturalnym otoczeniu pacjenta,
- wzorce chodu zbliżone do naturalnych.

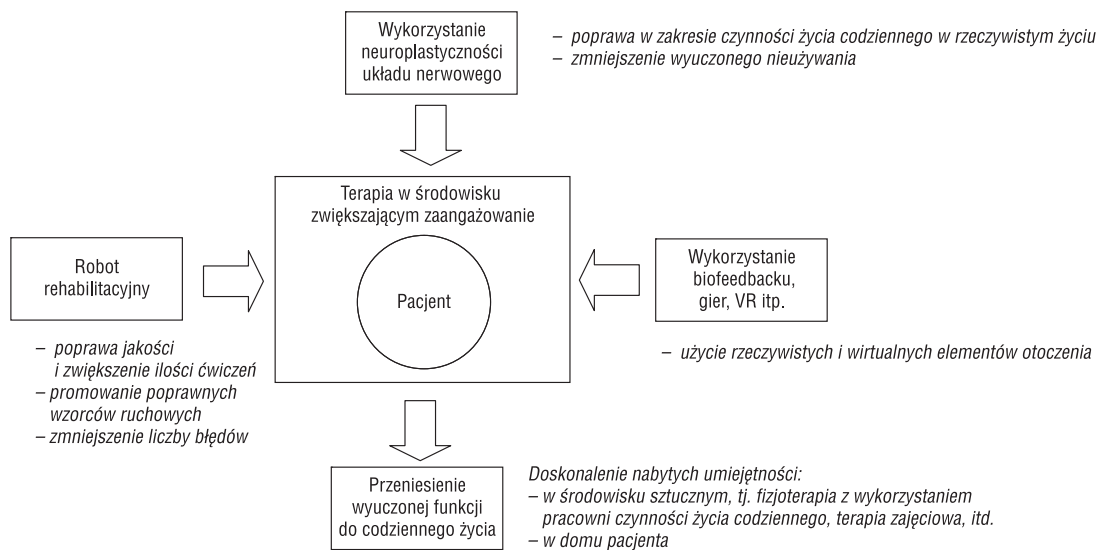
Przegląd 18. prac badawczych, dotyczących wykorzystania egzoszkieleatów w usprawnianiu chodu<sup>2</sup>, wykazał przydatność tych urządzeń, ciągle jednak brak jest obszerniejszych badań, szczególnie porównawczych z innymi formami usprawniania, jak np. za pomocą stacjonarnych robotów rehabilitacyjnych czy konwencjonalnych form terapii. Wynika to z niejednorodności pacjentów od strony funkcjonalnej – mimo tego samego rozpoznania, np. niedowład połowiczny czy niedowład czterokończynowy, ich stan funkcjonalny oraz w zakresie istniejących możliwości i potrzeb wsparcia może być różny. Porównanie terapii staje się trudne. Można także stwierdzić, że europejskie badania nad wykorzystaniem egzoszkieleatów są niezorganizowane i brakuje w tym obszarze wspólnej strategii międzynarodowej, która wydaje się konieczna ze względu na koszty i stopień złożoności badań. Tak np. obecnie badania nad wykorzystaniem izraelskiego egzoszkieleatu medycznego ReWalk prowadzone są przez naukowców z Włoch<sup>3</sup>, a nad klinicznym wykorzystaniem japońskiego egzoszkieleatu HAL5 badania rozpoczyna się w Niemczech<sup>4</sup>, podczas gdy wyniki badań prowadzonych w krajach skandynawskich nie zostały dotychczas opublikowane. W świetle powyższych badań, za najbardziej perspektywiczną kombinację uważa się połączenie egzoszkieleatu oraz funkcjonalnej stymulacji elektrycznej (ang. *functional electrical stimulation* – FES).

Wśród naukowców i specjalistów trwa dyskusja, czy wykorzystywane w robotach rehabilitacyjnych ćwiczenia powtarzane (ang. *repetitive exercises*) są najlepszą formą usprawniania (również w zależności od ich parametrów: intensywności, dokładności, liczby powtórzeń itd.). Nie wiadomo, czy ćwiczenia te, pomimo braku naturalnych wahań parametrów ruchu (w określonych granicach, koniecznych do wypracowania przez sieci neuronowe mózgu zdolności uczenia się, generalizacji wyuczonych wzorców do przypadków spoza ich zbioru oraz odporności na błędy), zapewniają optymalne bodźce do realizacji reorganizacji ośrodkowego

<sup>2</sup> J. Mehrholz, M. Pohl, *Electromechanical-assisted gait training after stroke: a systematic review comparing end-effector and exoskeleton device*, „Journal of Rehabilitation Medicine” 2012, Nr 44(3), s. 193–199

<sup>3</sup> P. Sale, M. Franceschini, A. Waldner i in., *Use of the robot assisted gait therapy in rehabilitation of patients with stroke and spinal cord injury*, „European Journal of Physical and Rehabilitation Medicine” 2012, Nr 48(1), s. 111–121

<sup>4</sup> Cyberdyne (Germany) GmbH w Bochum: <http://contec.de/aktuell-a-wissenswert/876-contec-wirkt-an-cyberdyne-gruendung-in-bochum-mit/>, [data pobrania: 05.09.2013]



**Rysunek 1. Miejsce robotów rehabilitacyjnych w strategii terapeutycznej** (opracowanie własne na podst. M. J. Johnson, *Recent trends in robot-assisted therapy environments to improve real-life functional performance after stroke*, „Journal of Neuroengineering and Rehabilitation” 2006, Nr 3, s. 29)

układu nerwowego<sup>5</sup>. Panuje opinia, że usprawnianie funkcji chodu z wykorzystaniem dostępnych obecnie robotów rehabilitacyjnych z bieżnią jest najbardziej efektywne dla pacjentów z poważnymi deficytami, ale może nie być optymalne dla pacjentów na dalszych etapach usprawniania, będących w stanie wykonywać bardziej złożone formy ćwiczeń<sup>6</sup>. Ruch pasywny oraz pasywna aktywacja mięśni bez stowarzyszonej koordynacji ruchów może być dalece niewystarczająca dla optymalizacji efektów usprawniania<sup>7</sup>, szczególnie w świetle braku sprawdzonych modeli kontroli ruchu, motorycznego uczenia się oraz funkcjonalnego zdrowienia, związanych z usprawnianiem z wykorzystaniem robotów rehabilitacyjnych<sup>8</sup>. Wyniki zrobotyzowanej terapii „wyizolowanego” mięśnia czy grupy mięśniowej mogą znacząco różnić się od wyników usprawniania w ramach całych strategii terapeutycznych (rysunek 1), w tym rozwiązań eklektycznych (mieszanych)<sup>9</sup>. Być może rozwój systemów sterowania

<sup>5</sup> A. Schück, R. Labruyère, H. Vallery i in., *Feasibility and effects of patient-cooperative robot-aided gait training applied in a 4-week pilot trial*, „Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation” 2012, Nr 9, s. 31

<sup>6</sup> Tamże

<sup>7</sup> N. Hogan, H. I. Krebs, B. Rohrer i in., *Motions or muscles? Some behavioral factors underlying robotic assistance of motor recovery*, „Journal of Rehabilitation Research and Development” 2006, Nr 5, s. 605–618

<sup>8</sup> S. Brochard, J. Robertson, B. Médée i in., *What’s new in new technologies for upper extremity rehabilitation?*, „Current Opinion in Neurology” 2010, Nr 6, s. 683–687; M. Casadio, P. Giannoni, L. Masia i in., *Robot therapy of the upper limb in stroke patients: preliminary experiences for the principle-based use of this technology*, „Functional Neurology” 2009, Nr 4, s. 195–202

<sup>9</sup> E. Mikołajewska, *Eclectic approach as the natural way of development in neurological rehabilitation of adults*, „International Journal on Disability and Human Development” 2012, doi 10.1515/ijhd-2012-0103; E. Mikołajewska, *Eclectic vs. specific approach within contemporary neurological physiotherapy*, „Journal of Health Sciences” 2012, Nr 2(1), s. 123–133

robotów rehabilitacyjnych oraz zwiększenie ich możliwości dostosowania parametrów ćwiczeń do aktualnych wyników ćwiczącego pacjenta zmieni ten stan. Należy również pamiętać, że zupełnie nowe możliwości mogą w tym zakresie dać egzoszkielety, w których nie wykorzystuje się bieżni, a naturalne podłoże otoczenia pacjenta.

W stosunku do konwencjonalnego, zalety ww. podejścia są następujące:

- częściowa automatyzacja procesu diagnostycznego i terapeutycznego,
- zmniejszenie liczby terapeutów biorących udział w usprawnianiu pojedynczego pacjenta,
- wzrost powtarzalności parametrów ćwiczeń oraz precyzji ich ustawień, z uwzględnieniem wzorców ruchu fizjologicznego lub zbliżonego do fizjologicznego (biorącego pod uwagę ograniczenia pacjenta),
- możliwość ćwiczeń w dynamicznym ociążeniu oraz adaptacyjnego wspomaganie przez robota zamiaru ruchu pacjenta (ang. *bio-cooperative control concept*),
- brak zmian parametrów ćwiczeń wynikających ze „zmęczenia” robota,
- możliwość praktycznie nieprzerwanego wykorzystania robota – za wyjątkiem przerw na zmianę pacjenta oraz konserwację robota,
- obiektywna kontrola położenia oraz sił przyłożonych do każdej z usprawnianych części ciała pacjenta,
- możliwość uzależnienia kierunku, szybkości i stopnia zmian parametrów ruchu od wyników uzyskiwanych przez danego pacjenta wcześniej podczas sesji terapeutycznej,
- w części robotów: możliwość zaprogramowania złożonych sekwencji ruchów, większej złożoności zadań, aż po zorientowanie na zadania funkcjonalne (szczególnie w usprawnianiu funkcji kończyn górnych),
- poprawione motywowanie pacjenta, szczególnie pacjenta pediatrycznego, dzięki wykorzystaniu biofeedbacku, gier komputerowych, systemów rzeczywistości wirtualnej (ang. *Virtual Reality – VR*) i innych form sprzężenia zwrotnego,
- wynikające z ww. potencjalnie lepsze wykorzystanie zdolności neuroplastycznych układu nerwowego oraz szybsze motoryczne uczenie się,
- próba obiektywizacji terapii: monitorowanie (w czasie rzeczywistym) ilości i jakości wykonywanych zadań (np. dzięki wbudowanym systemom analizy chodu), a także zmian w wynikach osiągniętych przez pacjenta w ramach kolejnych sesji terapeutycznych,
- bezpieczeństwo (zarówno pacjenta, jak i terapeuty obsługującego sprzęt), również automatyczne wyłączenie w przypadku np. zasłabnięcia pacjenta, co zwiększa możliwości wykorzystania robotów rehabilitacyjnych w rehabilitacji domowej lub telerehabilitacji.

Utrzymana zostaje indywidualizacja terapii, zorientowanie na cele pacjenta oraz zwiększenie jego zdolności funkcjonalnych; jest w stanie wzrosnąć efektywność rehabilitacji oraz

można przyspieszyć osiąganie kolejnych etapów usprawniania. W rzeczywistej praktyce klinicznej trudno jednak oddzielić efekt wykorzystania robotów rehabilitacyjnych od efektów synergii pozostałych oddziaływań. Roboty rehabilitacyjne, szczególnie w neurorehabilitacji, są na różnych etapach rehabilitacji wykorzystywane na równi z całą gamą innych oddziaływań: od interwencji chirurgicznych i neurochirurgicznych, poprzez farmakoterapię, aż po różne rodzaje oddziaływań klasycznej fizykoterapii i kinezyterapii. Na większości oddziaływań roboty rehabilitacyjne pozostają wciąż tylko jednym z wielu oddziaływań terapeutycznych, stąd trudno oczekiwać po nich nagłego skoku jakościowego w usprawnianiu. Wydaje się, że przyjdzie on z czasem, wraz z lepszym rozpoznaniem potencjału drzemiącego w różnego rodzaju robotach, ich oprogramowaniu sterującym i analitycznym (w tym opartym na różnych rodzajach inteligencji obliczeniowej) oraz współdziałaniu rozmaitych metod rehabilitacyjnych. Równolegle należy spodziewać się nie tylko rozwoju pozostałych systemów informatyki, automatyki i robotyki medycznej, ale również doskonalenia wiedzy i praktyki klinicznej z zakresu usprawniania, w tym mechanizmów nauki, kontroli i wykonania ruchu oraz neuroplastyczności w oparciu o badania eksperymentalne i obliczeniowe modele funkcjonowania układu nerwowego. Z ww. względów potencjał drzemiący w klinicznych zastosowaniach robotów rehabilitacyjnych może być ogromny. Dotychczas nie jest on jednak wykorzystywany z następujących przyczyn:

- brak wytycznych klinicznych i regulacji prawnych oraz metodologii badań i dedykowanych narzędzi diagnostycznych w omawianym zakresie,
- mała liczba randomizowanych prób klinicznych na dużych grupach pacjentów, szczególnie w zakresie terapii łączących różne metody, istotna zwłaszcza w obliczu dominacji paradygmatu Medycyny Opartej na Faktach (ang. *Evidence Based Medicine* – EBM),
- ograniczenia terapii w przypadku stacjonarnych robotów rehabilitacyjnych: terapia w miejscu, brak możliwości ćwiczenia chodu po schodach, brak możliwości ćwiczenia na zewnątrz pomieszczeń,
- wysokie wymagania dla personelu medycznego, a w telerehabilitacji również dla rodziny/opiekunów pacjentów,
- brak badań z zakresu długoterminowych skutków wykorzystywania robotów rehabilitacyjnych (w usprawnianiu pacjentów z deficytami neurologicznymi),
- wysoka cena oraz duże rozmiary (np. wysokość wymagająca adaptacji pomieszczeń) niektórych robotów.

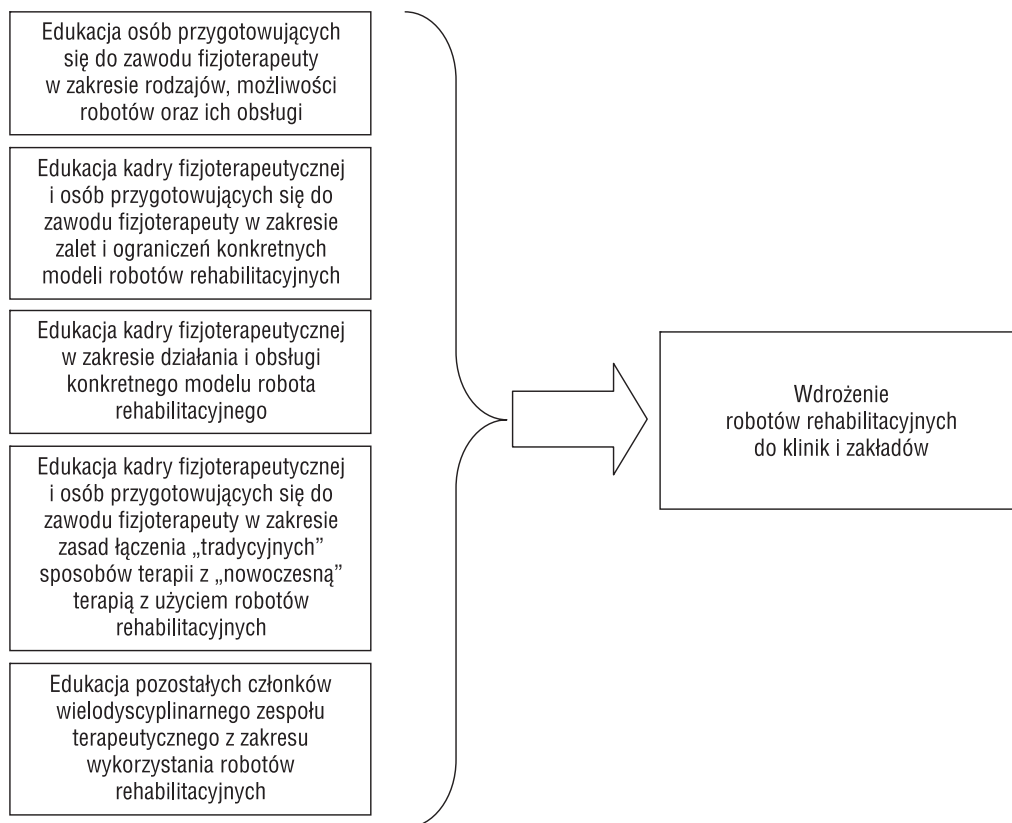
Z punktu widzenia metodyki wykorzystania robotów rehabilitacyjnych można wyróżnić dwa skrajne podejścia:

- robot jako idealna maszyna rehabilitacyjna, co na dzień dzisiejszy nie znajduje odzwierciedlenia w badaniach naukowych i praktyce klinicznej, a działa na niekorzyść szerszego wdrożenia robotów (gdyż związane jest raczej ze straszeniem specjalistów medycznych, że roboty ich zastąpią, co może obniżyć liczbę badań z omawianego zakresu),

- robot jako gadżet, służący raczej do przyciągnięcia pacjentów nowoczesnością oferowanej terapii niż przekładający się na istotną statystycznie większą efektywność usprawniania.

Wydaje się, że żadne z powyższych podejść nie jest słuszne, a właściwego należy szukać pośrodku. Wynika to z faktu, że w znacznej części zastosowań roboty rehabilitacyjne nie zastąpią doświadczonego specjalisty, jednak specjalista ten jest w stanie właściwie ocenić i wykorzystać potencjał terapeutyczny robotów rehabilitacyjnych jako rozwiązania uzupełniającego. Roboty dają, co prawda, możliwość przeniesienia części rehabilitacji do rehabilitacji domowej lub telerehabilitacji (również w postaci tzw. modelu hybrydowego, w którym kilkutygodniowe cykle rehabilitacji domowej przeplatają się z rehabilitacją ambulatoryjną), jednak dotyczy to różnych form rehabilitacji długoterminowej, np. kardiologicznej czy geriatrycznej. Pomimo znacznego postępu w dziedzinie systemów sterowania robotów rehabilitacyjnych trudno w najbliższym czasie spodziewać się znaczącej skokowej zmiany w samodzielności robotów rehabilitacyjnych, co stanowi jeden z czynników ograniczających. Druga bariera

### Warunki konieczne wdrożenia robotów rehabilitacyjnych:



**Rysunek 2. Warunki konieczne wdrożenia robotów rehabilitacyjnych do praktyki klinicznej**

Źródło: opracowanie własne

wynika z wniosków z wdrożenia wielofunkcyjnego wózka dla osób niepełnosprawnych iBot 4000. Pomimo że wózek ten był najnowocześniejszym tego typu komercyjnym rozwiązaniem na świecie, wyposażonym w tryb balansu, terenowy i wspinania się po schodach, producent w 2008 r. zawiesił jego produkcję, a z dniem 31 grudnia 2013 r. planuje całkowicie zawiesić działalność, w tym również wsparcia użytkownika i serwisu<sup>10</sup>. Próby przywrócenia produkcji, podejmowane w 2010 r. i 2011 r., na chwilę obecną nie przyniosły rezultatu. Jedną z przyczyn jest prawdopodobnie wysoki koszt wózka, który nie zwrócił się nawet na ogromnym i bogatym rynku USA, zatem możemy się spodziewać, że bez istotnego obniżenia cen i kosztów utrzymania robotów rehabilitacyjnych nieprędko zagospodzą one masowo w domach pacjentów. Potwierdzeniem tego jest także fakt, że wynajem wózków czy egzozkieletów (w przypadku HAL5 w Japonii) nie ratuje sytuacji biznesowej ich producentów.

### Interakcja człowiek-maszyna i sterowanie robotem rehabilitacyjnym

Interfejs człowiek-maszyna robota rehabilitacyjnego należy uznać za interfejs zorientowany na użytkownika (ang. *human-centered interface*), lecz jest on zorganizowany w szczególny sposób, gdyż zarówno operator robota, jak i materiał, nad którym robot pracuje, jest człowiekiem<sup>11</sup>. Nakłada się na to konieczność uwzględnienia zupełnie nowych czynników w procesie interakcji człowiek-robot, związanych m.in. z biomechanicznymi własnościami ciała ludzkiego oraz rolę plastyczności mózgu w kontrolowanym powrocie do zdrowia<sup>12</sup>. Sterowanie robotami rehabilitacyjnymi stanowi ogromne wyzwanie: z jednej strony 250 stopni swobody (ang. *degrees of freedom* – DOF) w stawach człowieka<sup>13</sup> oraz niepoznane do końca mechanizmy sterowania nimi przez układ nerwowy (w tym neuroplastycznej adaptacji układu nerwowego w przypadku działania w warunkach uszkodzenia), a z drugiej, konieczność sprostania ograniczeniom narzucanym przez koordynację (w tym współdziałanie synergistyczne mięśni), siłę, szybkość i bezwładność poszczególnych części ciała poruszających się zgodnie z zadaniem przez układ nerwowy (ale robotowi nie do końca znanym) programem. Kluczowa jest tu identyfikacja naturalnych (lub zbliżonych do naturalnych) wzorców ruchu oraz odtworzenie ich w systemie sterowania robota (np. przy pomocy tzw. procesorów mięśniowych, czyli modeli pracy i współdziałania mięśni). W przypadku osób z deficytami ruchowymi w programie robota należy uwzględnić ponadto rodzaje i stopnie deficytów występujących u pacjenta, powiązanych z nimi zmian w parametrach ruchu (niekiedy tylko jednej z kończyn, przy współdziałaniu kończyny

<sup>10</sup> <http://www.ibotnow.com/service.html>, [data pobrania: 09.06.2013]

<sup>11</sup> M. Casadio, R. Ranganathan, F. A. Mussa-Ivaldi, *The body-machine interface: a new perspective on an old theme*, „Journal of Motor Behavior” 2012, Nr 44(6), s. 419–433

<sup>12</sup> I. Viaud-Delmon, A. Gaggioli, A. Ferscha i in., *Human computer confluence applied in healthcare and rehabilitation*, „Studies in Health Technology and Informatics” 2012, Nr 181, s. 42–45; P. M. Rossini, M. A. Noris Ferilli, F. Ferreri, *Cortical plasticity and brain computer interface*, „European Journal of Physical and Rehabilitation Medicine” 2012, Nr 48(2), s. 307–312

<sup>13</sup> *Podstawy robotyki. Teoria i elementy manipulatorów i robotów*, red. A. Morecki, J. Knapczyk, Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1999, s. 497–530



zdrowej i objętej deficytem) oraz opracowanie programu rehabilitacji, czyli w przypadku terapii określenie jej celów, wynikających z nich ćwiczeń oraz spodziewanej dynamiki zmian parametrów ćwiczeń wraz z poprawą motoryczną (lub jej brakiem – w przypadku korekty programu rehabilitacji). Trzeba pamiętać, że robot współdziała z pacjentem, zatem kluczowe dla zapewnienia niezwłocznej reakcji robota rehabilitacyjnego na aktywność pacjenta podczas terapii jest włączenie ćwiczącego pacjenta w pętlę sterowania (ang. *bio-cooperative human-in-the-loop control*)<sup>14</sup> robota. W ten sposób system sterowania robota rehabilitacyjnego może nie tylko uwzględniać w programie terapii możliwości i ograniczenia pacjenta, ale również wprowadzać do programu poprawki związane ze zmęczeniem, brakiem motywacji do ćwiczeń czy zmianami w stanie zdrowia. Ustawienia robota powinny uwzględniać:

- powtarzalność ruchów (zbliżona maksymalnie do naturalnych wzorców ruchu dla danego pacjenta), ale jednocześnie (częściowo sztuczne) ograniczenie do minimum naturalnej zmienności ruchów, konieczność uwzględnienia bezwładności elementów ruchomych robota,
- aktywny udział pacjenta w ruchu (odciążanie co najwyżej częściowe, jedynie aby wspierać wysiłek pacjenta, tzw. paradygmat AAN – ang. *assist as needed*),
- duże wymagania odnośnie do strategii sterowania (np. *impedance control, path control*)<sup>15</sup>,
- pełne wspomaganie w przypadku pacjentów z porażeniami.

Jest to tym trudniejsze, że pomimo możliwej do sformułowania (w różnych wariantach, zarówno hierarchicznych, systemowych, jak i innych) koncepcji sterowania położeniem i ruchem ciała człowieka (np. w układzie nadążnym), to w warunkach rzeczywistych nie spotyka się dwóch identycznych położeń oraz dwóch identycznych ruchów. Nie do końca sprecyzowany jest bowiem wpływ szeregu czynników, m.in. czasów obiegu informacji sterującej w rzeczywistym układzie nerwowym, optymalizacji energetycznej w układzie nerwowym wynikającej z wielu kolejnych doświadczeń oraz wpływu szumu na układ nerwowy<sup>16</sup>. Jak zwykle od tej reguły są wyjątki, np. w postaci modelu prostych ruchów u pacjentów z autyzmem według Włodzisława Duchy i in., gdzie powtarzalność może być znacznie większa ze względu na specyfikę schorzenia<sup>17</sup>. W tych warunkach przywracanie umiejętności ru-

<sup>14</sup> E. Rocon, J. L. Pons, *Exoskeletons in rehabilitation robotics: tremor suppression*, Berlin, Heidelberg: Springer, 2011; J. L. Pons, *Wearable robots: biomechatronic exoskeletons*, Chichester, John Wiley & Sons, 2008; A. K. König, *Advancements and future directions in rehabilitation robotics: human-in-the-loop control during neurological gait rehabilitation*, Saarbrücken, Südwestdeutscher Verlag für Hochschulschriften, 2011; R. Heliot, C. Azevedo, B. Espiau, *Functional rehabilitation: coordination of artificial and natural controllers*, [w:] *Rehabilitation robotics*, red. S. S. Kommu, Vienna, InTech Open, 2007, s. 163–186; R. Zollo, D. Formica, E. Guglielmelli, *Bio-inspired interaction control of robotic machines for motor therapy*, [w:] *Rehabilitation robotics*, red. S. S. Kommu, dz. cyt., s. 619–638

<sup>15</sup> A. Schück, R. Labruyère, H. Vallery i in., *Feasibility and effects of patient-cooperative robot-aided gait training applied in a 4-week pilot trial*, „Journal of Neuroengineering and Rehabilitation” 2012, Nr 9, s. 31

<sup>16</sup> A. A. Faisal, L. P. Selen, D. M. Wolpert, *Noise in the nervous system*, „Nature Reviews Neuroscience” 2008, Nr 9(4), s. 292–303

<sup>17</sup> K. Dobosz, D. Mikołajewski, G. M. Wójcik, W. Duch, *Simple cyclic movements as a distinct autism feature – computational approach*, „Computer Science Journal” 2013 [w druku]

chowych oraz ich doskonalenie z wykorzystaniem robotów rehabilitacyjnych w organizmie ludzkim dotkniętym patologią nabiera znamion prawdziwego wyzwania.

Należy pamiętać, że wykorzystanie systemów inteligencji obliczeniowej, w tym sieci neuronowych, logiki rozmytej, ekstrakcji wiedzy z danych czy wnioskowania z niepełnych danych pozwala na wyodrębnienie z posiadanych danych dodatkowej wiedzy, w tym powiązań trudnych do uchwycenia innymi metodami oraz ich niealgorytmiczną generalizację na pozostałe przypadki, przydatną przy indywidualnym podejściu do pacjentów.

Rozwój systemów sterowania robotów rehabilitacyjnych wymaga dalszych badań w obszarach dotyczących:

- metodyki planowania rehabilitacji z wykorzystaniem robotów rehabilitacyjnych oraz oceny i wniosków z dynamiki jej zmian; efekty krótkoterminowe i długoterminowe,
- wnioskowania z automatycznie aktualizowanej bazy wiedzy na temat pacjentów (ich dotychczasowych wyników, postępów w terapii i zmian parametrów) i efektywności różnych ustawień robota w zależności od deficytów pacjenta, jego wieku itp.,
- klasyfikacji terapii tradycyjnej i zrobotyzowanej oraz wzajemnego przenikania i uzupełniania się ich oddziaływań, w tym na potrzeby oceny efektywności terapii,
- systemów bezpieczeństwa robotów rehabilitacyjnych, w tym wykorzystywanych w rehabilitacji domowej i telerehabilitacji.

## **Roboty w rehabilitacji neurologicznej**

Neurorehabilitacja wydaje się największym polem do twórczych zastosowań robotów rehabilitacyjnych. Różnorodność rodzajów i poziomów deficytów, ich współwystępowanie, długi czas trwania i uporczywość terapii oraz często występująca konieczność jej kontynuacji w domu pacjenta (również dla podtrzymania już osiągniętych efektów terapii) powoduje, że każdy element podwyższający efektywność neurorehabilitacji jest pożądany. Włączenie robota rehabilitacyjnego do programu rehabilitacji pacjenta z deficytem neurologicznym wymaga przede wszystkim:

- obiektywnej oceny możliwości funkcjonalnych pacjenta (co pacjent wykonuje) oraz jego potencjału (co mógłby wykonywać, z określoną, tymczasową lub stałą pomocą),
- określenia potrzeb i związanych z nimi realnych do zdefiniowania, zmierzenia i osiągnięcia celów pacjenta na kolejnych etapach terapii,
- określenia wskazań i przeciwwskazań pacjenta do wykorzystania robotów rehabilitacyjnych (tiki nerwowe, silne leki, zaburzenia psychiczne, brak czucia, przykurcze, trudno gojące się rany, odleżyny, otarcia i inne),
- określenia elementów programu rehabilitacji, które będą możliwe do efektywniejszej (szybszej, dokładniejszej, według innego kryterium) realizacji z wykorzystaniem robotów rehabilitacyjnych,
- przejście do kolejnych etapów realizacji, oceny postępów i korekt planu rehabilitacji.

W obszarze zastosowań klinicznych, szczególnie w neurorehabilitacji, kwestie techniczne schodzą na dalszy plan za własnościami użytkowymi oraz udowodnioną w trakcie randomizowanych prób klinicznych większą efektywnością w porównaniu z metodami tradycyjnymi.

Zasadnicze obszary badań:

- rozwój interfejsów haptycznych (sztucznego dotyku), podwyższających efektywność usprawniania w deficytach czucia<sup>18</sup>,
- wykorzystania usprawniania pacjentów z deficytami dotyczącymi tylko jednej strony, np. kończyny dolnej (ang. *asymmetric leg operation*); również egzoskielety dla pacjentów z hemiplegią<sup>19</sup>,
- możliwość wykorzystania u pacjentów z zaburzeniami świadomości, zarówno w celu zapobiegania szkodliwym zmianom wtórnym, jak i zapewnienie odpowiedniej ilości i jakości bodźców.

Z klinicznego punktu widzenia bardzo ciekawym kierunkiem rozwoju byłaby automatyzacja i robotyzacja niedocenianego rozwiązania, jakim jest uniwersalny gabinet usprawniania leczniczego, który, mądrze i efektywnie wykorzystany, mógłby stać się skalowalnym, łatwym do rozbudowy i modernizacji robotem rehabilitacyjnym do wykorzystania (w zależności od wyposażenia) w warunkach szpitalnych, ambulatoryjnych, domowych i do telerehabilitacji. Z punktu widzenia metodyki projektowania takiego zrobotyzowanego gabinetu i jego systemów sterowania pierwowzór już istnieje – jest nim zestaw Lego Mindstorms<sup>20</sup>, wykorzystywany obecnie zarówno do testowania projektów naukowych, jak i zastosowań popularyzujących robotykę.

## Roboty w rehabilitacji pediatrycznej

Elementy pediatryczne są obecnie zabudowywane opcjonalnie w robotach do usprawniania funkcji kończyn dolnych: Lokomat i ReoAmbulator; prowadzone są również badania nad wersją pediatryczną egzoskieletu HAL5. Niestety, w dostępnej literaturze brak jest danych na temat robotów konstruowanych od podstaw z myślą o pacjentach pediatrycznych. Najwięcej prac (około 30.) dotyczy wykorzystania różnych form robotów rehabilitacyjnych w usprawnianiu dzieci z mózgowym porażeniem dziecięcym. Obecnie roboty pediatryczne do usprawniania funkcji kończyn górnych i dolnych to mniejsze wersje robotów dla osób dorosłych. Specyficzne wymagania dla wersji pediatrycznych to atrakcyjny wygląd robotów oraz możliwość uatrakcyjnienia terapii poprzez np. ekrany z grami, VR lub ciekawą

<sup>18</sup> E. B. Brokaw, T. M. Murray, T. Nef i in., *Time independent functional task training: a case study on the effect of inter-joint coordination driven haptic guidance in stroke therapy*, „Proceedings of the International Conference on Rehabilitation Robotics” 2011, s. 5975501; S. Hussein, J. Kruger, *Patient adaptive control of end-effector based gait rehabilitation devices using a haptic control framework*, „Proceedings of the International Conference on Rehabilitation Robotics” 2011, s. 5975451

<sup>19</sup> H. Kawamoto, T. Hayashi, T. Sakurai i in., *Development of single leg version of HAL for hemiplegia*, „Proceedings of the International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society” 2009, s. 5038–43

<sup>20</sup> <http://mindstorms.lego.com/en-us/default.aspx>, [data pobrania: 09.06.2013]

propozycją filmową. Roboty pediatryczne terapeutyczne mogą być wykorzystywane również do innych celów niż bezpośrednia terapia funkcji kończyn górnych i dolnych. Mogą stanowić element uatrakcyjniający terapię, jak np. robot PARO (co ciekawe, za prekursorów robotów terapeutycznych można uznać m.in. proste robotyczne zabawki, np. Azora<sup>21</sup> Janusza Wojciechowskiego z 1958 r.). Roboty pediatryczne są zobowiązane w sposób szczególny zapewniać bezpieczeństwo użytkownika – roboty wykorzystywane przez dzieci muszą uwzględniać ich pomysłowość i ciekawość. Konieczne są także dalsze badania nad reakcjami dzieci w sytuacji długotrwałego użytkowania robotów w terapii najmłodszych. Zupełnie odmiennym kierunkiem badań jest wykorzystanie robotów jako narzędzi terapeutycznych i edukacyjnych, np. u dzieci z autyzmem<sup>22</sup>. Ze względu na różnorodność możliwych zastosowań i funkcji pojawia się konieczność rozróżnienia sposobów oddziaływania: z przewagą oddziaływania fizycznego w robotach rehabilitacyjnych (pojawiła się nawet nazwa „aktywne roboty rehabilitacyjne”) oraz z przewagą oddziaływania poznawczego i kształtującego zachowanie społeczne w robotach terapeutycznych. Jest to o tyle ważne, że harmonijny rozwój dziecka z deficytem neurologicznym wymaga odpowiedniej stymulacji i jednoczesnego rozwoju na wszystkich płaszczyznach.

## Roboty w rehabilitacji geriatrycznej

Roboty w rehabilitacji geriatrycznej w sposób szczególny muszą, oprócz warunków bezpieczeństwa, uwzględniać wymagania, jakie stawiają schorzenia charakterystyczne dla okresu starzenia się, jak np. osteoporoza czy zmiany w zakresie funkcji poznawczych. Dla osób starszych, szczególnie z obecnych pokoleń, nowości technologiczne w dużym procencie są elementem obcym dla ich najbliższego, naturalnego środowiska. O ile pewna grupa osób starszych aprobeuje telefony komórkowe oraz wykorzystanie komputerów w codziennym życiu, o tyle bardziej skomplikowane, wysokiej klasy roboty rehabilitacyjne mogą być przez nie nieakceptowane<sup>23</sup>.

## Bezpieczeństwo robotów rehabilitacyjnych

W odróżnieniu od innych rodzajów robotów (np. przemysłowych) roboty rehabilitacyjne muszą zapewnić bezpieczeństwo pacjenta i terapeuty/operatora w obrębie przestrzeni roboczej manipulatorów. Ze względu na fakt, że człowiek jest nie tylko operatorem, ale również

<sup>21</sup> J. Wojciechowski, *Nowoczesne zabawki*, Warszawa, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 1962

<sup>22</sup> M. Bailey-Van Kuren, *Robotic solutions in pediatric rehabilitation*, [w:] *Rehabilitation robotics*, red. S. S. Kommu, dz. cyt., s. 1–12; S. E. Fasoli, B. Ladenheim, J. Mast i in., *New horizons for robot-assisted therapy in pediatrics*, „American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation” 2012, Nr 91(11 Suppl 3), s. S280–289; P. R. Penn, F. D. Rose, D. A. Johnson, *Virtual enriched environments in paediatric neuropsychological rehabilitation following traumatic brain injury: Feasibility, benefits and challenges*, „Developmental Neurorehabilitation” 2009, Nr 12(1), s. 32–43

<sup>23</sup> E. Mikołajewska, D. Mikołajewski, *Możliwości wykorzystania robotów pomocniczych i obsługowych w opiece domowej*, „Gerontologia Polska” 2011, Nr 19(3–4), s. 176–180

obiektem manipulacji, nawet drobny, pojedynczy błąd robota może kosztować zdrowie lub życie ludzkie. Mocowanie pacjenta do maszyny, a w przypadku niektórych robotów (np. egzoszkieleatów) wręcz zamknięcie pacjenta we wnętrzu robota, utrudnia reagowanie w sytuacjach awaryjnych. Stąd zasadnicze przyczyny urazów mogą być różnego typu:

- mechaniczne: udar/uderzenie powodujące obrzęki, rany itp.,
- elektryczne: porażenie, oddziaływanie fali elektromagnetycznej,
- akustyczne: grzmot/ogłuszenie, dźwięki niskiej częstotliwości mogące powodować bezsenność itp.

Dodatkowe zagrożenia powoduje również fakt, że rehabilitacji zrobotyzowanej są poddawani pacjenci z różnego rodzaju deficytami motorycznymi i poznawczymi, w tym czucia, wymagający szczególnej troski terapeuty w obszarze zapobiegania urazom. Zdarzają się również pacjenci „nadambitni”, kontynuujący ćwiczenia pomimo ewidentnych oznak bólu, co może doprowadzić nie tylko do urazu, ale w jego efekcie również do wstrzymania całej terapii lub nawet cofnięcia jej efektów. W obszarze bezpieczeństwa wykorzystania robotów do usprawniania kluczowa wydaje się zatem współpraca pacjent-terapeuta. Nabiera ona szczególnego znaczenia w zakresie rehabilitacji domowej i telerehabilitacji, gdzie potencjalne luki w nadzorze nad pacjentem ćwiczącym z robotem mogą mieć nieodwracalne konsekwencje zdrowotne.

Ze względu na trudności w wyizolowaniu czynników powodujących urazy oraz ich odseparowanie od pacjenta i terapeuty, stosuje się dwa podejścia w strategiach bezpieczeństwa:

- przedkontaktowe (minimalizujące ryzyko zajścia urazu),
- pokontaktowe (minimalizujące efekty zajścia urazu).

Zasadnicze przedsięwzięcia w obszarze bezpieczeństwa robotów rehabilitacyjnych realizowane są w trakcie ich projektowania (w tym tworzenia oprogramowania) i mają na celu unikanie sytuacji mogących powodować zagrożenia, ich nakładanie się na siebie kumulujące szkodliwy efekt oraz niezwłoczne reagowanie na błędy robota (zatrzymanie awaryjne). Z definicji takie sytuacje są niepożądane oraz nieplanowane, zatem reakcja systemu sterowania musi być niezwłoczna. Stąd też dwie zasadnicze strategie bezpieczeństwa w robotyce rehabilitacyjnej:

- strategia projektowania bezpieczeństwa (ang. *safety design strategy*),
- strategia kontroli bezpieczeństwa (ang. *safety control strategy*).

Te nie w pełni jeszcze rozwinięte strategie zostały ujęte w postaci norm/rekomendacji (por. ISO/IEC Guide 51:1999 *Safety for machinery*<sup>24</sup>); rozwijane są techniki analizy w tym zakresie (np. *fault tree analysis* – FTA, *failure mode effects analysis* – FMEA, podejścia mieszane). Inną kwestią stanowią pytania, czy i jakie urazy (np. otarcia tkanki miękkiej) są ak-

<sup>24</sup> M. Nokata, N. Tejima, *A Safety strategy for rehabilitation robots*, [w:] Z. Z. Bien, D. Stefanov, *Advances in rehabilitation robotics. Human-friendly technologies on movement assistance and restoration for people with disabilities. Lecture Notes in Control and Information Science*, Nr 306, Berlin, Springer Verlag, 2004, s. 177–185

ceptowalne jako efekt wykorzystywania robota rehabilitacyjnego i jak je obiektywnie oceniać i kwalifikować z zachowaniem EBM<sup>25</sup>.

Oczekiwania w zakresie bezpieczeństwa wykorzystania robotów rehabilitacyjnych w praktyce klinicznej są następujące:

- większa świadomość wśród pacjentów i personelu medycznego w zakresie możliwości robotów rehabilitacyjnych,
- indywidualne scenariusze ćwiczeń,
- adaptacyjna kontrola ruchu,
- obiektywizacja danych z czujników i ich analiza w czasie rzeczywistym.

## Rozwiązania krajowe

Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów, częściowo we współpracy z Instytutem Technologii Eksploatacji w Radomiu, oferuje szereg ciekawych rozwiązań robotów rehabilitacyjnych. Zaliczają się do nich przede wszystkim RENUS-1, RENUS-2 oraz należący do zupełnie innej grupy robotów, ale wart wspomnienia jest również manipulator mobilny NOSZATOR-1 – ich zastosowanie i możliwości przedstawiono w tabeli 1.

Zespół z Politechniki Śląskiej w Gliwicach (obecnie we współpracy z firmą EgzoTech) kontynuuje prace nad krajowym egzoszkieletem w ramach projektu „Jednoosiowy egzoszkielec ramienia sterowany elektromiogramem” oraz rozpoczął prace nad rehabilitacyjnym egzoszkieletem na kończyny dolne<sup>26</sup>.

Instytut Techniki i Aparatury Medycznej prowadzi badania nad robotami rehabilitacyjnymi w ramach projektu badawczego rozwojowego „Zrobotyzowane urządzenie rehabilitacyjne do prowadzenia wielopłaszczyznowego ruchu biernego i czynnego kończyn górnych z wykorzystaniem metod neurofizjologicznych”<sup>27</sup>, mającego na celu opracowanie robota do usprawniania funkcji kończyn górnych w oparciu o zasady dość szeroko stosowanej w neurorehabilitacji metody PNF (ang. *Proprioceptive Neuromuscular Facilitation*).

Kilka polskich zespołów, m.in. na Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, pracuje nad robotami do reedukacji chodu dzieci<sup>28</sup>.

<sup>25</sup> M. Nokata, K. Ikuta, H. Ishii, *Safety evaluation method of rehabilitation robots*, [w:] Z. Z. Bien, D. Stefanov, *Advances in rehabilitation robotics. Human-friendly technologies on movement assistance and restoration for people with disabilities. Lecture Notes in Control and Information Science*, dz. cyt., s. 187–198; N. Tejjima, *Risk reduction mechanisms for safe rehabilitation robots*, [w:] Z. Z. Bien, D. Stefanov, *Advances in rehabilitation robotics. Human-friendly technologies on movement assistance and restoration for people with disabilities. Lecture Notes in Control and Information Science*, dz. cyt., s. 199–207; S. Riderick, C. Carignan, *Designing safety-critical rehabilitation robots*, [w:] *Rehabilitation robotics*, red. S. S. Kommu, dz. cyt., s. 43–64; M. Nokata, K. Ikuta, *Risk evaluation of human care robots*, [w:] *Rehabilitation robotics*, red. S. S. Kommu, dz. cyt., s. 359–370

<sup>26</sup> <http://egzo.polsl.pl/>, [data pobrania: 06.06.2013]

<sup>27</sup> <http://www.itam.zabrze.pl/obszary-dzialalnosci/projekty-rozwojowe/831-r13-027-02>, [data pobrania: 06.06.2013]

<sup>28</sup> <http://www.krim.agh.edu.pl>, [data pobrania: 06.06.2013]

Tabela 1 Roboty medyczne opracowane w PIAP

Nazwa	Zastosowanie	Podstawowe cechy użytkowe z klinicznego punktu widzenia
RENUS-1	Mechatroniczny system wspomagania rehabilitacji ruchowej kończyny górnej u pacjentów po udarach mózgu lub schorzeniach ortopedycznych <sup>26</sup>	Trzy podstawowe tryby: uczenia, pasywny i aktywny, Ćwiczenia wymagające złożonej przeprogramowanej trajektorii ruchu w przestrzeni, Kontrola parametrów ruchu, sił i momentów sił pomiędzy kończyną pacjenta a elementami robota, Analiza postępów pacjenta w oparciu o zgromadzone dane, Opcja: nadzorowanie przez fizjoterapeutów wielu ćwiczących pacjentów.
RENUS-2	Mechatroniczny system wspomagania rehabilitacji ruchowej kończyn dolnych pacjentów <sup>27</sup>	Trzy podstawowe tryby: uczenia, pasywny i aktywny (w tym aktywny z regulowanym oporem), Ćwiczenia wymagające złożonej przeprogramowanej trajektorii ruchu w przestrzeni, Kontrola parametrów ruchu, sił i momentów sił pomiędzy kończyną pacjenta a elementami robota, Analiza postępów pacjenta w oparciu o zgromadzone dane, Opcja: nadzorowanie przez fizjoterapeutów wielu ćwiczących pacjentów, Zakres prędkości ruchu: 0,01–0,50 m/s, Powtarzalność pozycjonowania ramienia robota – ok. 8 mm
NOSZATOR-1	Manipulator mobilny do obsługi szpitalnej osób z upośledzeniem układu ruchu <sup>28</sup>	Krótkodystansowa zmiana położenia leżącego pacjenta bez zmiany jego pozycji, przydatność w opiece nad pacjentami „leżącymi”, również z zaburzeniami świadomości. Robot umożliwi dojazd do łóżka pacjenta, podebranie leżącego pacjenta na nosze, a następnie przewiezienie i opuszczenie pacjenta w miejscu przeznaczenia, Opcje: wykonywanie wybranych badań i zabiegów na pacjencie w pozycji leżącej „uniesionej”, pomiar masy ciała pacjenta.

Źródło: opracowanie własne

## Inne rozwiązania dostępne na terenie naszego kraju

### Usprawnianie kończyn dolnych

Klasyfikacja robotów rehabilitacyjnych dopuszcza rozwiązania o różnej konstrukcji oraz stopniu złożoności systemu sterowania. Z tego powodu do grupy robotów przeznaczonych do usprawniania funkcji kończyn dolnych można zaliczyć zarówno dość proste urządzenia dedykowane zwiększeniu zakresu ruchu (ang. *range of motion* – ROM) w jednym stawie (kolanowym, biodrowym), jak również złożone systemy rehabilitacyjne wyposażone w dużą ilość elementów opcjonalnych. Zamieszczone w tabeli 2 porównanie kładzie nacisk na możliwości wykorzystania klinicznego przedstawionych urządzeń, gdyż ze względu na istotne różnice konstrukcyjne możliwości ich standaryzacji (poza ogólnymi wytycznymi oraz niektórymi standardami wymiany danych) są ograniczone.

<sup>29</sup> <http://www.piap.pl/OFERTA/Technologie-w-medycynie/RENUS-1-Mechatroniczny-system-wspomagania-rehabilitacji-ruchowej-osob-po-udarach-mozgu-lub-schorzeniach-ortopedycznych>, [data pobrania: 06.06.2013]

<sup>30</sup> <http://www.piap.pl/OFERTA/Technologie-w-medycynie/RENUS-2-Mechatroniczny-system-wspomagania-rehabilitacji-ruchowej-konczyn-dolnych-pacjentow>, [data pobrania: 06.06.2013]

<sup>31</sup> <http://www.piap.pl/OFERTA/Technologie-w-medycynie/NOSZATOR-1-Manipulator-mobilny-do-obsługi-szpitalnej-osob-z-upośledzeniem-układu-ruchu>, [data pobrania: 06.06.2013]

Baza MERODA wymienia obecnie 14 projektów urządzeń zrobotyzowanych, przeznaczonych do usprawniania funkcji kończyn dolnych. Do najpopularniejszych rozwiązań zagranicznych tego typu, dostępnych w naszym kraju, należą Lokomat i ReoAmbulator. Rozwiązaniami o zbliżonym przeznaczeniu, nie omawianymi w niniejszym tekście, są: stół pionizacyjny z funkcją kroczenia Erigo oraz zrobotyzowane łóżko szpitalne z funkcją usprawniania kończyn dolnych ANYMOV.

**Tabela 2. Porównanie wybranych dostępnych w Polsce zrobotyzowanych urządzeń do usprawniania funkcji kończyn dolnych**

Parametr	ReoAmbulator Motorika Medical Inc., USA	Lokomat Pro Hocoma, Szwajcaria
Wymiary i waga	Długość z rampą: 236 cm Szerokość: 122–223 cm (w zależności od położenia elementów roboczych) Wysokość: 183–259 cm Waga: 794 kg	Długość z rampą: 330–400 cm (w zależności od typu bieżni) Szerokość: 185 cm Wysokość: 259–279 cm (w zależności od wyposażenia) Waga: 1 100 kg
Zakres regulacji prędkości chodu	Robot: 0,01–2,4 km/h Bieżnia: 0,01–3,2 km/h	Robot: 1–3,2 km/h Bieżnia: 0–5 km/h
System odciążenia	Automatyczny: 0–80 kg	Automatyczny: system LOKOLIFT Ręczny: zestaw obciążników (5–80 kg co 5 kg)
Ograniczenia dot. pacjenta	Maksymalna waga: 136 kg Maksymalny wzrost: 210 cm	Maksymalna waga: 135 kg Maksymalny wzrost: 205 cm, dodatkowo długość kości udowej od krętarza wielkiego do szpary stawu kolanowego: 350–470 mm
Ograniczenia modułu pediatrycznego	Wzrost powyżej 120 cm	Długość kości udowej od krętarza wielkiego do szpary stawu kolanowego: 210–350 mm
Biofeedback	Wizualny VR HD dla dorosłych i dzieci	Wizualny VR dla dorosłych i dzieci
Wybrane pozostałe elementy wyposażenia i opcje	Narzędzia do sterowania i analizy chodu ReoAmbulator Patient Progress Reports oraz Session Analysis Reports Kamizelki i uprząże Rampa podjazdowa dla wózków Bieżnia zintegrowana Oddzielne poręcze do wjeżdżania oraz do ćwiczeń	Narzędzie do analizy chodu Lokocontrol Kamizelki i akcesoria Dwa rodzaje bieżni Rampa podjazdowa dla wózków Poręcze regulowane na szerokość i wysokość

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych producentów

## Usprawnianie kończyn górnych

Zwzględniając złożoność funkcji i uniwersalność wykorzystania kończyn górnych wdrożenie robotów rehabilitacyjnych do ich usprawniania jest jeszcze bardziej skomplikowaną kwestią niż w przypadku reedukacji chodu. Oczywiście można tu czerpać z doświadczeń z protezowania kończyn górnych, jednak braki w zakresie pięciopalczastej protezy kończyny górnej nie pozwalają na pełne ich wykorzystanie<sup>32</sup>. Dodatkowo złożoność diagnostyki, wielowymiarowość

<sup>32</sup> E. Mikołajewska, D. Mikołajewski, *Neuroproteza – sztuczna kończyna górna o pięciu palcach – stan obecny i perspektywy rozwoju*, „Postępy Rehabilitacji” 2012, Nr 26(3), s. 41–46



oraz stosunkowo długi czas trwania usprawniania funkcji kończyny górnej wymaga z reguły szybkiego i częstego reagowania na postępy pacjenta w formie modyfikacji planu rehabilitacji (zmiany oddziaływań i ich wzajemnego oddziaływania, jak również współdziałania z interwencjami chirurgicznymi, farmakoterapią i aparutowaniem<sup>33</sup>). Z tego powodu stosowanie tylko jednego narzędzia, nawet zaawansowanego technicznie robota rehabilitacyjnego, nie wyczerpie możliwych rozwiązań oraz nie pełni oczekiwań klinicystów, szczególnie w zakresie diagnostyki postępów (obiektywność, dokładność, powtarzalność, por. *inter-rater reliability*) i wytycznych do modyfikacji planu rehabilitacji<sup>34</sup>. Przedstawione w tabeli 3 porównanie daje jedynie pewien obraz rozwiązań dostępnych w naszym kraju i już obecnie wykorzystywanych klinicznie.

Baza MERODA wymienia obecnie 22 projekty urządzeń zrobotyzowanych przeznaczonych do usprawniania funkcji kończyn górnych. Do najpopularniejszych rozwiązań zagranicznych tego typu, dostępnych w naszym kraju, należą ReoGo, Armio i Hand Tutor.

**Tabela 3. Porównanie wybranych dostępnych w Polsce zrobotyzowanych urządzeń do usprawniania funkcji kończyn górnych**

Parametr	Armeo w wersji Power Hocoma, Szwajcaria	ReoGo Motorika Medical Inc., USA	Hand Tutor MediTouch Ltd., Izrael
Liczba trybów ćwiczeń	2	5	-
Regulowany stopień trudności	Tak	Tak	Tak
Ćwiczenie chwytu dłoni	Tak	Tak, również z wykorzystaniem dodatkowego dużego przycisku	Tak
Podparcie ramienia	Tak	Tak	Brak
Możliwość ćwiczenia przez osobę na wózku	Tak	Tak – z dodatkowym wyposażeniem	Tak
Biofeedback	Tak	Tak	Tak
Gry	Tak	Tak	Tak
Obrazowanie ćwiczeń na ekranie komputera oraz analiza statystyczna wyników (opcja)	Tak – z dodatkowym wyposażeniem	Tak	Tak

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych producentów

Wydaje się, że wobec toczących się dyskusji należy zwrócić uwagę na opinie, iż właściwie wykorzystany robot rehabilitacyjny efektywnie uzupełnia terapeutę (np. zwiększając intensywność i dokładność rehabilitacji), ale w większości przypadków obecnie nie jest w stanie całkowicie go zastąpić<sup>35</sup>.

<sup>33</sup> I. Pasternak-Mlądzka, R. Dobaczewska, D. Otręba i in., *Poprawa funkcji ręki spastycznej u pacjentów po udarze mózgu*, „Rehabilitacja Medyczna” 2006, Nr 3, s. 21–28

<sup>34</sup> J. Szczechowicz, *Pomiary kątowe zakresu ruchu. Zapis pomiaru metodą SFTR*, Kraków, Wydawnictwo AWF w Krakowie, 2004; M. Pieniążek, W. Chwałę, J. Szczechowicz i in., *Poziom ruchomości w stawach kończyny górnej podczas wykonywania czynności życia codziennego w świetle badań z wykorzystaniem systemu trójwymiarowej analizy ruchu – doniesienie wstępne*, „Ortopedia, Traumatologia, Rehabilitacja” 2007, Nr 4, s. 413–422; O. Wolińska, J. Zwolińska, A. Kwolek, *Weryfikacja oceny funkcji ręki w skali Brunnstrom z wykorzystaniem elektronicznego urządzenia do diagnostyki ręki u pacjentów po udarze mózgu*, „Przegląd Medyczny Uniwersytetu Rzeszowskiego” 2007, Nr 4, s. 350–354

<sup>35</sup> H. I. Krebs, S. Mernoff, S. E. Fasoli i in., *A comparison of functional and impairment-based robotic training in severe to moderate chronic stroke: a pilot study*, „NeuroRehabilitation” 2008, Nr 1, s. 81–87

## Systemy wspomagające

Do podstawowych systemów wspomagających i uzupełniających roboty rehabilitacyjne należą:

- systemy posiadające możliwości różnicowania trudności np. przez dobór nachylenia bieżni, choć obecnie nie pozwalają one na ćwiczenia marszu po torze krzywoliniowym (zakręty), po schodach, po powierzchniach o niepewnym podparciu (np. piasek) czy po powierzchniach o zmiennym współczynniku tarcia,
- systemy uwzględniające wnioski z budowy robota chirurgicznego Robin Heart, w tym m.in. interfejs haptyczny<sup>36</sup>,
- Google Glass i systemy rzeczywistości rozszerzonej (ang. *Augmented Reality*),
- systemy umożliwiające terapeutyczne wykorzystanie komercyjnych konsoli do gier Nintendo Wii, Sony Play Station Eye Toy czy Kinect<sup>37</sup>,
- środowiska VR<sup>38</sup>, poprawiające (z klinicznego punktu widzenia) integrację ćwiczeń z czynnościami wykonywanymi w codziennym życiu dzięki realistycznym scenariuszom i sprzężeniom zwrotnym: wzrokowemu, słuchowemu oraz niekiedy haptycznemu – w ten zakres wchodzi również rozwiązania, takie jak Neuroforma (Titanis) oraz Nirvana (BTS).

## Kierunki rozwoju

Najważniejszym czynnikiem, wpływającym na przyszłościowe szersze wykorzystanie robotów rehabilitacyjnych, są wiarygodne i powtarzalne badania kliniczne, potwierdzające efektywność tej formy rehabilitacji w zastosowaniu klinicznych, w tym w ramach paradygmatu EBM. Dotychczasowe wyniki badań i praktyki klinicznej z wykorzystaniem robotów rehabilitacyjnych pozwalają patrzeć optymistycznie na następujące podstawowe kierunki ich dalszego rozwoju:

- badania w celu poznania naturalnych mechanizmów nauki i kontroli ruchu człowieka oraz odtworzenie ich w algorytmie działania robota,
- opracowanie strategii zmian parametrów oraz łączenia oddziaływań pozwalające na odpowiedni dobór oraz wariantowanie ćwiczeń,
- uwzględnienie w strategiach rehabilitacji zrobotyzowanej składowych biomechanicznych, neurofizjologicznych i poznawczych, pozwalające na równoczesne usprawnianie wszystkich aspektów funkcjonowania pacjenta,

<sup>36</sup> Z. Nawrat, *State of the art in medical robotics in Poland: development of the Robin Heart and other robots*, „Expert Review of Medical Devices” 2012, Nr 9(4), s. 353–359

<sup>37</sup> Z. Nawrat, *State of the art in medical robotics in Poland: development of the Robin Heart and other robots*, „Expert Review of Medical Devices” 2012, Nr 9(4), s. 353–359

<sup>38</sup> R. F. Boian, G. C. Burdea, J. E. Deutsch, *Robotics and Virtual Reality applications in mobility rehabilitation*, [w:] *Rehabilitation robotics*, red. S. S. Kommu, dz. cyt., s. 27–42

- uwzględnienie w strategiach rehabilitacji zrobotyzowanej zarówno ponownego uczenia się prostych ruchów aż po złożone sekwencje ruchów niezbędnych do realizacji czynności życia codziennego<sup>39</sup>,
- opracowanie spójnych wskazań i przeciwwskazań do kierowania na rehabilitację z wykorzystaniem robotów, zarówno pacjentów dorosłych, jak i dzieci,
- porównanie i rozgraniczenie pomiędzy terapią nazywaną umownie „klasyczną” a terapią zrobotyzowaną i ich zastosowaniami zgodnie z EBM,
- podejmowanie badań nad zagadnieniami bezpieczeństwa przy wykorzystywaniu robotów rehabilitacyjnych oraz metodyki właściwego przygotowania specjalistów medycznych (ze szczególnym uwzględnieniem fizjoterapeutów), pacjentów oraz ich rodzin/opiekunów<sup>40</sup>,
- opracowanie metodologii randomizowanych prób klinicznych z wykorzystaniem robotów rehabilitacyjnych z udziałem pacjentów w różnych stanach chorobowych, w tym z zaburzeniami czucia, porażeniami czy zaburzeniami świadomości,
- rozwój telerehabilitacji<sup>41</sup>, szczególnie kardiologicznej i ortopedycznej,

Oprócz ww. interesujące są zagadnienia:

- z zakresu sensoryki, systemów nawigacji i systemów rozpoznawania obiektów/pacjentów/terapeutów (np. na podstawie twarzy czy głosu),
- szerszego wykorzystania biologicznego sprzężenia zwrotnego (ang. *biofeedback*), systemów rzeczywistości wirtualnej oraz rzeczywistości rozszerzonej (ang. *augmented reality* – AR) oraz interfejsów haptycznych (dotykowych),
- integracji robotów rehabilitacyjnych (szczególnie w rehabilitacji szpitalnej, w domach opieki i domowej), w ramach większych środowisk: szpitalnych systemów informacyjnych (ang. *Hospital Information System* – HIS), inteligentnego domu (ang. *smart home*)<sup>42</sup>, inteligentnego otoczenia (ang. *Ambient Intelligence* – Aml) czy zintegrowanego środowiska osoby niepełnosprawnej<sup>43</sup>,

<sup>39</sup> S. Masiero, E. Carraro, C. Ferraro i in., *Upper limb rehabilitation robotics after stroke: a perspective from the University of Padua, Italy*, „Journal of Rehabilitation Medicine” 2009, Nr 12, s. 981–985; H. S. Lo, S. Q. Xie, *Exoskeleton robots for upper-limb rehabilitation: state of the art and future prospects*, „Medical Engineering & Physics” 2012, Nr 3, s. 261–268

<sup>40</sup> E. Mikołajewska, D. Mikołajewski, *Bezpieczeństwo pracy z robotami rehabilitacyjnymi*, „Bezpieczeństwo Pracy” 2012, Nr 2, s. 9–11

<sup>41</sup> D. Hailey, R. Roine, A. Ohinmaa i in., *Evidence of benefit from telerehabilitation in routine care: a systematic review*, „Journal of Telemedicine and Telecare” 2011, Nr 6, s. 281–287; M. Rogante, M. Grigioni, D. Cordella i in., *Ten years of telerehabilitation: A literature overview of technologies and clinical applications*, „NeuroRehabilitation” 2010, Nr 4, s. 287–304; E. Mikołajewska, D. Mikołajewski, *Telerehabilitacja*, „Rehabilitacja w Praktyce” 2011, Nr 1, s. 64–67

<sup>42</sup> J. T. Giger, M. Markward, *The need to know caregiver perspectives toward using smart home technology*, „Journal of Social Work in Disability & Rehabilitation” 2011, Nr 2, s. 96–114; A. Brandt, K. Samuelsson, O. Töytäri i in., *Activity and participation, quality of life and user satisfaction outcomes of environmental control systems and smart home technology: a systematic review*, „Disability and Rehabilitation: Assistive Technology” 2011, Nr 3, s. 189–206

<sup>43</sup> E. Mikołajewska, D. Mikołajewski, *E-learning in the education of people with disabilities*, „Advances in Clinical and Experimental Medicine” 2011, Nr 1, s. 103–109; E. Mikołajewska, D. Mikołajewski, *Wheelchair development from the perspective of physical therapists and biomedical engineers*, „Advances in Clinical and Experimental Medicine” 2010, Nr 6, s. 771–776

- zautomatyzowanego usprawniania czucia, w tym kształtu i faktury powierzchni,
- rozwoju oddziaływań i sposobów ich aplikacji, np. w postaci skalowanych rozwiązań wykorzystywanych w zależności od potrzeb i możliwości pacjenta: od rękawic, uprząży na kończynę lub całą połowę ciała, aż po egzoszkielety<sup>44</sup>,
- możliwości medycznego wykorzystania istniejących rozwiązań komercyjnych, takich jak Apple Magic Mouse, Kinetic, Kinect, Move, Eye Toy, czy prostych interfejsów mózg-komputer (ang. *Brain-Computer Interface* – BCI),
- możliwości szerszego wykorzystania wbudowanych w roboty rehabilitacyjne urządzeń diagnostycznych oraz opracowania nowych metodologii pomiarów dedykowanych terapii zrobotyzowanej<sup>45</sup>.

Należy zauważyć, że w związku z rozwojem robotyki medycznej pojawi się kwestia aparowania kończyn, które będą coraz częściej bazować na neuroprotezach ruchowych<sup>46</sup> oraz jego wpływ na możliwości dalszego rozwoju i efektywność terapii zrobotyzowanej. W związku z postępującą znaczną politechnizacją rehabilitacji (roboty rehabilitacyjne, nowoczesne protezy, zrobotyzowane wózki dla niepełnosprawnych, interfejsy mózg-komputer, systemy informatyczne do analizy funkcji, w tym chodu itd.) i postępem w transplantologii (m.in. szersze wykorzystanie przeszczepów od dawców niespokrewnionych oraz komórek macierzystych) należy spodziewać się zarówno nowych form terapii, jak i nacisku na lepsze przygotowanie specjalistyczne, w takim samym stopniu specjalistów medycznych (w tym fizjoterapeutów), jak i pacjentów oraz ich rodzin/opiekunów. Możliwe skrócenie czasu pobytu pacjenta w szpitalu oraz przejście robotów do rehabilitacji domowej i telerehabilitacji (np. w rehabilitacji kardiologicznej) powoduje nacisk na nowe formy edukacji i zdalnego nadzoru, a także konieczność wypracowania nowych metod diagnostyki funkcjonalnej.

## Podsumowanie

Ograniczona liczba prac badawczych utrudnia prognozowanie w obszarze przyszłej roli robotów rehabilitacyjnych w praktyce klinicznej. Jednak dynamika przyrostu publikacji oraz ich tematyka wskazuje na rosnące zainteresowanie problemem zarówno naukowców, jak i klinicystów i dowodzi istnienia znacznego potencjału w tym obszarze.

Trudności w reedukacji chodu wynikają zarówno z ciężaru niedowładnego ciała pacjenta, jak również ze skomplikowanego mechanizmu chodu. Roboty rehabilitacyjne używane w reedukacji chodu, oprócz bezpieczeństwa, muszą zapewnić odciążenie oraz wsparcie lub

<sup>44</sup> E. Mikołajewska, D. Mikołajewski, *Neurorehabilitacja XXI wieku. Techniki teleinformatyczne*, Kraków, Impuls, 2011

<sup>45</sup> S. H. Scott, S. P. Dukelow, *Potential of robots as next-generation technology for clinical assessment of neurological disorders and upper-limb therapy*, „Journal of Rehabilitation Research and Development” 2011, Nr 4, s. 335–353

<sup>46</sup> M. Pieniążek, M. Pelczar-Pieniążek, J. Szczechowicz, *Dokładność aparowania jako podstawowy determinant wyników usprawniania osób po leczeniu operacyjnym uszkodzeń ścięgien zginaczy palców ręki w II strefie urazowej*, „Rehabilitacja Medyczna” 2004, Nr 3, s. 23–32; A. Shaikhouni, J. B. Elder, *Computers and neurosurgery*, „World Neurosurgery” 2012, Nr 78(5), s. 392–398; S. Oung, B. M. Pohl, U. G. Hofmann, *Preliminary design of a tendon-based anthropomorphic robotic hand*, „Biomedizinische Technik (Berlin)” 2012, doi: 10.1515/bmt-2012-4222

zastąpienie ruchu chodu z zachowaniem wszystkich determinantów chodu. Roboty rehabilitacyjne wykorzystywane w usprawnianiu funkcji kończyny górnej, oprócz bezpieczeństwa, muszą zapewniać wsparcie osłabionej siły mięśniowej oraz pracę nad wyjątkowo skomplikowanym działaniem dłoni w bardzo dużej ilości stopni swobody. Nowoczesne technologie próbują uprościć tak wysoko postawionej poprzeczce, dzięki czemu, w przypadkach do tej pory trudno lub nie poddających się reedukacji funkcji, terapia prawdopodobnie będzie możliwa.

Rozwijanie robotyki rehabilitacyjnej jest konieczne, ponieważ skomplikowane funkcje naszego ciała z nieskończoną liczbą możliwych kombinacji ruchu są niełatwe do odtworzenia przez człowieka, a tym bardziej trudne do wielogodzinnego powtarzania bez zmęczenia terapeuty. Oczywiście nie można zapominać o roli człowieka w procesie terapii. Eklektyzm terapii jest nieodzowny. Połączenie pracy terapeuty z pracą robota jest nie do wyeliminowania. Analiza i wyciąganie wniosków z danych pozyskiwanych od robotów rehabilitacyjnych wymaga wysoko wykwalifikowanego i doświadczonego terapeuty. Czynniki współtowarzyszące, jakie terapeuta musi wziąć pod uwagę podczas terapii, w tym terapii z użyciem robotów rehabilitacyjnych, są liczne i o bardzo zróżnicowanym charakterze. Do takich czynników należą np. wyniki analizy krwi (np. poziom D dimerów), stan psychiczny pacjenta, jego nastrój i samopoczucie w danym dniu. To są czynniki, których robot rehabilitacyjny nie uwzględni w swojej terapii. Jednak stopień wsparcia i precyzja, z jaką można sterować robotami rehabilitacyjnymi, wnosi tak wiele do terapii, że nierozsądnym byłoby nie skorzystać z takich zdobytych techniki. Konieczna jest jednak edukacja personelu w zakresie umiejętności włączania robotów do procesu terapeutycznego tak, by stanowiły one wsparcie w kompleksowej terapii, a nie odosobniony czynnik terapeutyczny.

Nie ulega więc wątpliwości, że prace nad wykorzystaniem robotów do usprawniania oraz klinicznymi procedurami ich użycia są konieczne, szczególnie w przypadkach, gdy można uprościć rehabilitację w najcięższych przypadkach wymagających reedukacji chodu oraz tam, gdzie można zwiększyć dostępność i podwyższyć efektywność rehabilitacji jako oddziaływania kompleksowego. Jest to ważne w obliczu spodziewanego postępu związanego z unowocześnianiem protez oraz w dziedzinie przeszczepów, w tym zarówno kończyn górnych, jak i dolnych.

## Literatura

- Bailey-Van Kuren M., *Robotic solutions in pediatric rehabilitation*, [w:] *Rehabilitation robotics*, red. Kommu S. S., Vienna, InTech Open, 2007
- Boian R. F., Burdea G. C., Deutsch J. E., *Robotics and Virtual Reality applications in mobility rehabilitation*, [w:] *Rehabilitation robotics*, red. Kommu S. S., Vienna, InTech Open, 2007
- Brandt A., Samuelsson K., Töytäri O. i in., *Activity and participation, quality of life and user satisfaction outcomes of environmental control systems and smart home technology: a systematic review*, „Disability and Rehabilitation: Assistive Technology” 2011, Nr 3
- Brichetto G., Spallarossa P., Carvalho M. L. de i in., *The effect of Nintendo Wii on balance in people with multiple sclerosis: a pilot randomized control study*, „Multiple Sclerosis” 2013 [Epub ahead of print]

- Brochard S., Robertson J., Médée B. i in., *What's new in new technologies for upper extremity rehabilitation?*, „Current Opinion in Neurology” 2010, Nr 6
- Brokaw E. B., Murray T. M., Nef T. i in., *Time independent functional task training: a case study on the effect of inter-joint coordination driven haptic guidance in stroke therapy*, „Proceedings of the International Conference on Rehabilitation Robotics” 2011
- Casadio M., Giannoni P., Masia L. i in., *Robot therapy of the upper limb in stroke patients: preliminary experiences for the principle-based use of this technology*, „Functional Neurology” 2009, Nr 4
- Casadio M., Ranganathan R., Mussa-Ivaldi F. A., *The body-machine interface: a new perspective on an old theme*, „Journal of Motor Behavior” 2012, Nr 44(6)
- Dobosz K., Mikołajewski D., Wójcik G. M. i in., *Simple cyclic movements as a distinct autism feature – computational approach*, „Computer Science Journal” 2013 [w druku]
- Faisal A. A., Selen L. P., Wolpert D. M., *Noise in the nervous system*, „Nature Reviews Neuroscience” 2008, Nr 9(4)
- Fasoli S. E., Ladenheim B., Mast J. i in., *New horizons for robot-assisted therapy in pediatrics*, „American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation” 2012, Nr 91(11 Suppl 3)
- Giger J. T., Markward M., *The need to know caregiver perspectives toward using smart home technology*, „Journal of Social Work in Disability & Rehabilitation” 2011, Nr 2
- Hailey D., Roine R., Ohinmaa A. i in., *Evidence of benefit from telerehabilitation in routine care: a systematic review*, „Journal of Telemedicine and Telecare” 2011, Nr 6
- Héliot R., Azevedo C., Espiau B., *Functional rehabilitation: coordination of artificial and natural controllers*, [w:] *Rehabilitation robotics*, red. Kommu S. S., Vienna, InTech Open, 2007
- Hillman L., *Rehabilitation robotics from past to present? a historical perspective*, [w:] Bien Z. Z., Stefanov D., *Advances in rehabilitation robotics. Human-friendly technologies on movement assistance and restoration for people with disabilities. Lecture Notes in Control and Information Science*, Nr 306, Berlin, Springer Verlag, 2004
- Hogan N., Krebs H. I., Rohrer B. i in., *Motions or muscles? Some behavioral factors underlying robotic assistance of motor recovery*, „Journal of Rehabilitation Research and Development” 2006, Nr 5
- Hussein S., Kruger J., *Patient adaptive control of end-effector based gait rehabilitation devices using a haptic control framework*, „Proceedings of the International Conference on Rehabilitation Robotics” 2011
- Johnson M. J., *Recent trends in robot-assisted therapy environments to improve real-life functional performance after stroke*, „Journal of Neuroengineering and Rehabilitation” 2006, Nr 3
- Kawamoto H., Hayashi T., Sakurai T. i in., *Development of single leg version of HAL for hemiplegia*, „Proceedings of the International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society” 2009
- König A. K., *Advancements and future directions in rehabilitation robotics: human-in-the-loop control during neurological gait rehabilitation*, Saarbrücken, Südwestdeutscher Verlag für Hochschulschriften, 2011
- Kres H. I., Mernoff S., Fasoli S. E. i in., *A comparison of functional and impairment-based robotic training in severe to moderate chronic stroke: a pilot study*, „NeuroRehabilitation” 2008, Nr 1
- Lo H. S., Xie S. Q., *Exoskeleton robots for upper-limb rehabilitation: state of the art and future prospects*, „Medical Engineering & Physics” 2012, Nr 3
- Masiero S., Carraro E., Ferraro C. i in., *Upper limb rehabilitation robotics after stroke: a perspective from the University of Padua, Italy*, „Journal of Rehabilitation Medicine” 2009, Nr 12
- Mehrholz J., Pohl M., *Electromechanical-assisted gait training after stroke: a systematic review comparing end-effector and exoskeleton devices*, „Journal of Rehabilitation Medicine” 2012, Nr 44(3)
- Mikołajewska E., *Eclectic approach as the natural way of development in neurological rehabilitation of adults*, „International Journal on Disability and Human Development” 2012, doi 10.1515/ijhd-2012-0103
- Mikołajewska E., *Eclectic vs. specific approach within contemporary neurological physiotherapy*, „Journal of Health Sciences” 2012, Nr 2(1)

- Mikołajewska E., Mikołajewski D., *Bezpieczeństwo pracy z robotami rehabilitacyjnymi*, „Bezpieczeństwo Pracy” 2012, Nr 2
- Mikołajewska E., Mikołajewski D., *E-learning in the education of people with disabilities*, „Advances in Clinical and Experimental Medicine” 2011, Nr 1
- Mikołajewska E., Mikołajewski D., *Możliwości automatyzacji i robotyzacji otoczenia osoby niepełnosprawnej*, „Niepełnosprawność – zagadnienia, problemy, rozwiązania” 2013, Nr 2
- Mikołajewska E., Mikołajewski D., *Możliwości wykorzystania robotów pomocniczych i obsługowych w opiece domowej*, „Gerontologia Polska” 2011, Nr 19(3–4)
- Mikołajewska E., Mikołajewski D., *Neuroproteza – sztuczna kończyna górna o pięciu palcach – stan obecny i perspektywy rozwoju*, „Postępy Rehabilitacji” 2012, Nr 26(3)
- Mikołajewska E., Mikołajewski D., *Neurorehabilitacja XXI wieku. Techniki teleinformatyczne*, Kraków, Impuls, 2011
- Mikołajewska E., Mikołajewski D., *Telerehabilitacja*, „Rehabilitacja w Praktyce” 2011, Nr 1
- Mikołajewska E., Mikołajewski D., *Wheelchair development from the perspective of physical therapists and biomedical engineers*, „Advances in Clinical and Experimental Medicine” 2010, Nr 6
- Nawrat Z., *State of the art in medical robotics in Poland: development of the Robin Heart and other robots*, „Expert Reviews Medical Devices” 2012, Nr 9(4)
- Nokata M., Ikuta K., Ishii H., *Safety evaluation method of rehabilitation robots*, [w:] Bien Z. Z., Stefanov D., *Advances in rehabilitation robotics. Human-friendly technologies on movement assistance and restoration for people with disabilities. Lecture Notes in Control and Information Science*, Nr 306, Berlin, Springer Verlag, 2004
- Nokata M., Ikuta K., *Risk evaluation of human care robots*, [w:] *Rehabilitation robotics*, red. Kommu S. S., Vienna, InTech Open, 2007
- Oung S., Pohl B. M., Hofmann U. G., *Preliminary design of a tendon-based anthropomorphic robotic hand*, „Biomedizinische Technik (Berlin)” 2012, doi: 10.1515/bmt-2012-4222
- Pasternak-Mładzka I., Dobaczewska R., Otręby D. i in., *Poprawa funkcji ręki spastycznej u pacjentów po udarze mózgu*, „Rehabilitacja Medyczna” 2006, Nr 3
- Penn P. R., Rose F. D., Johnson D. A., *Virtual enriched environments in paediatric neuropsychological rehabilitation following traumatic brain injury: Feasibility, benefits and challenges*, „Developmental Neurorehabilitation” 2009, Nr 12
- Pieniążek M., Chwała W., Szczechowicz J. i in., *Poziom ruchowości w stawach kończyny górnej podczas wykonywania czynności życia codziennego w świetle badań z wykorzystaniem systemu trójwymiarowej analizy ruchu – doniesienie wstępne*, „Ortopedia, Traumatologia, Rehabilitacja” 2007, Nr 4
- Pieniążek M., Pelczar-Pieniążek M., Szczechowicz J., *Dokładność aparatuowania jako podstawowy determinant wyników usprawniania osób po leczeniu operacyjnym uszkodzeń ścięgien zginaczy palców ręki w II strefie urazowej*, „Rehabilitacja Medyczna” 2004, Nr 3
- Plow M., Finlayson M. A., *Qualitative study exploring the usability of Nintendo Wii fit among persons with Multiple Sclerosis*, „Occupational Therapy International” 2013, doi: 10.1002/oti.1345
- Podstawy robotyki. Teoria i elementy manipulatorów i robotów*, red. Morecki A., Knapczyk J., Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1999
- Pons J. L., *Wearable robots: biomechatronic exoskeletons*, Chichester, John Wiley & Sons, 2008
- Rocon E., Pons J. L., *Exoskeletons in rehabilitation robotics: tremor suppression*, Berlin, Heidelberg: Springer, 2011
- Riderick S., Carignan C., *Designing safety-critical rehabilitation robots*, [w:] *Rehabilitation robotics*, red. Kommu S. S., Vienna, InTech Open, 2007
- Rogante M., Grigioni M., Cordella D. i in., *Ten years of telerehabilitation: A literature overview of technologies and clinical applications*, „NeuroRehabilitation” 2010, Nr 4
- Rossini P. M., Noris Ferilli M. A., Ferreri F., *Cortical plasticity and brain computer interface*, „European Journal of Physical and Rehabilitation Medicine” 2012, Nr 48(2)

Sale P., Franceschini M., Waldner A. i in., *Use of the robot assisted gait therapy in rehabilitation of patients with stroke and spinal cord injury*, „European Journal of Physical and Rehabilitation Medicine” 2012, Nr 48(1)

Schück A., Labruyère R., Vallery H. i in., *Feasibility and effects of patient-cooperative robot-aided gait training applied in a 4-week pilot trial*, „Journal of Neuroengineering and Rehabilitation” 2012, Nr 9

Scott S. H., Dukelow S. P., *Potential of robots as next-generation technology for clinical assessment of neurological disorders and upper-limb therapy*, „Journal of Rehabilitation Research and Development” 2011, Nr 4

Shaikhouni A., Elder J. B., *Computers and neurosurgery*, „World Neurosurgery” 2012, Nr 78(5)

Szczechowicz J., *Pomiary kątowne zakresu ruchu. Zapis pomiaru metodą SFTR*, Kraków, Wydawnictwo AWF w Krakowie, 2004

Tejima N., *Risk reduction mechanisms for safe rehabilitation robots*, [w:] Bien Z. Z., Stefanov D., *Advances in rehabilitation robotics. Human-friendly technologies on movement assistance and restoration for people with disabilities. Lecture Notes in Control and Information Science*, Nr 306, Berlin, Springer Verlag, 2004

Viaud-Delmon I., Gaggioli A., Ferscha A. i in., *Human computer confluence applied in healthcare and rehabilitation*, „Studies in Health Technology and Informatics” 2012, Nr 181

Solińska O., Zwolińska J., Kwolek A., *Weryfikacja oceny funkcji ręki w skali Brunnstrom z wykorzystaniem elektronicznego urządzenia do diagnostyki ręki u pacjentów po udarze mózgu*, „Przegląd Medyczny Uniwersytetu Rzeszowskiego” 2007, Nr 4

Zollo R., Formica D., Guglielmelli E., *Bio-inspired interaction control of robotic machines for motor therapy*, [w:] *Rehabilitation robotics*, red. Kommu S. S., Vienna, InTech Open, 2007

### Strony internetowe:

*Cyberdyne (Germany) GmbH w Bochum*: <http://contec.de/aktuell-a-wissenswert/876-contec-wirkt-an-cyberdyne-gruendung-in-bochum-mit/>, [data pobrania: 05.09.2013]

<http://egzo.polsl.pl/>, [data pobrania: 06.06.2013]

<http://www.ibotnow.com/service.html>, [data pobrania: 09.06.2013]

<http://www.itam.zabrze.pl/obszary-dzialalnosci/projekty-rozwojowe/831-r13-027-02>, [data pobrania: 06.06.2013]

<http://www.krim.agh.edu.pl>, [data pobrania: 06.06.2013]

<http://mindstorms.lego.com/en-us/default.aspx>, [data pobrania: 09.06.2013]

<http://www.piap.pl/OFERTA/Technologie-w-medycynie/NOSZATOR-1-Manipulator-mobilny-do-obslugi-szpitalnej-osob-z-uposledzeniem-ukladu-ruchu>, [data pobrania: 06.06.2013]

<http://www.piap.pl/OFERTA/Technologie-w-medycynie/RENUS-1-Mechatroniczny-system-wspomagania-rehabilitacji-ruchowej-osob-po-udarach-mozgu-lub-schorzeniach-ortopedycznych>, [data pobrania: 06.06.2013]

<http://www.piap.pl/OFERTA/Technologie-w-medycynie/RENUS-2-Mechatroniczny-system-wspomagania-rehabilitacji-ruchowej-konczyn-dolnych-pacjentow>, [data pobrania: 06.06.2013]

<http://www.umm.uni-heidelberg.de/apps/ortho/meroda/>, [data pobrania: 05.06.2013]