

dr EMILIA MIKOŁAJEWSKA
Klinika Rehabilitacji w Bydgoszczy
mgr inż. DARIUSZ MIKOŁAJEWSKI
Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu

Bezpieczeństwo pracy z robotami rehabilitacyjnymi

Robotyka rehabilitacyjna jest postrzegana jako użycie robotów w rehabilitacji różnych schorzeń, szczególnie związanych z motoryką człowieka, kardiologicznych i neurologicznych. Może być postrzegana jako dobre rozwiązanie, aby poprawić efektywność, zaoszczędzić czas oraz zmniejszyć koszty opieki zdrowotnej osób niepełnosprawnych, ciężko chorych i w podeszłym wieku. Artykuł jest próbą oceny, w jakim stopniu wykorzystuje się możliwości w tym obszarze, kładąc nacisk na bezpieczeństwo robotów rehabilitacyjnych oraz analizę zagrożeń. Ze względu na brak badań i publikacji konieczne są dalsze badania w omawianym zakresie.

Occupational safety and rehabilitation robots

Rehabilitation robotics is perceived as the use of robotic devices in rehabilitating various conditions, especially motor, cardiological and neurological ones. It can be perceived as a good solution in improving efficiency, saving time and reducing the cost of healthcare of patients with disabilities, those severely ill and elderly ones. This article aims at investigating the extent to which the available opportunities are used, with a particular focus on how safe of rehabilitation robots are and what threat they pose. As there are no relevant studies or publications, further research is necessary.



Fot. Hocoma

Wstęp

Zgodnie z danymi Medical Robotics Database (MeRoDA) [1] na świecie realizowanych jest 456 projektów z dziedziny robotyki medycznej, w tym 46 w dziedzinie robotyki rehabilitacyjnej. Dla porównania z chirurgii ogólnej realizowane są 143 projekty, 68 z diagnostyki obrazowej, 56 z ortopedii, a z neurochirurgii – 50. Na rynku polskim są dostępne liczne urządzenia zaliczane do kategorii robotów rehabilitacyjnych i liczba ta będzie systematycznie rosła, ze względu na zalety ich wykorzystywania jako uzupełniającej lub, w niektórych wypadkach, podstawowej formy rehabilitacji.

Wykorzystanie robotów rehabilitacyjnych, również w naszym kraju, staje się coraz powszechniejsze. Wydaje się jednak, że problemowi bezpieczeństwa pracy z robotami rehabilitacyjnymi nie poświęca się wystarczającej uwagi. Celem artykułu jest przedstawienie szans i zagrożeń związanych z tym zagadnieniem, próba oceny, na ile możliwości w tym zakresie zostały wykorzystane oraz wskazanie kierunków dalszych badań.

Zagrożenia występujące w pracy z wykorzystaniem robotów rehabilitacyjnych

Terapia z wykorzystaniem robota rehabilitacyjnego stwarza zagrożenia zarówno dla pacjenta poddanego terapii, jak i dla terapeuty kierującego robotem i/lub współuczestniczącego

w terapii. Zagrożenia te, przy prawidłowo funkcjonującym robocie, mogą być spowodowane przede wszystkim przez niezgodne z zasadami bezpieczeństwa postępowanie człowieka (zarówno fizjoterapeuty, jak i pacjenta), gdyż części ruchome robota oddziałują bezpośrednio na ciało pacjenta, często operując w bezpośredniej bliskości fizjoterapeuty. Możliwe jest również nieprawidłowe funkcjonowanie robota, zarówno na skutek awarii, jak i jego błędnego zaprogramowania. Należy przy tym pamiętać, że poddawany terapii pacjent, szczególnie neurologiczny, może mieć zaburzone czucie i niewłaściwie odbierać bodźce, co powoduje, że wybrane dla niego parametry terapii mogą okazać się niewłaściwe i prowadzić do bólu, uszkodzenia tkanek itp. Podobny efekt może przynieść terapia w przypadku pacjentów z zachowanym kontaktem, ale bardzo „ambitnych” – nie zgłaszają bólu, bo chcą „wytrzymać”.

W omawianym zakresie konieczna jest ciągła analiza zagrożeń oraz opracowanie wciąż nowych rozwiązań zapewniających bezpieczeństwo robotów rehabilitacyjnych. Poprawienie bezpieczeństwa dotyczy zarówno kwestii organizacyjnej (w tym przygotowania terapeuty i pacjenta oraz miejsca zabiegu), technologicznej (robota wraz z kompletnymi i sprawnymi akcesoriami niezbędnymi do zabiegu), jak i ograniczeń systemów sterowania (oprogramowania) robota rehabilitacyjnego.

Szanse związane z wykorzystaniem robotów rehabilitacyjnych

Wykorzystanie robotów rehabilitacyjnych, zarówno jako podstawowej, jak i uzupełniającej formy rehabilitacji, niesie ze sobą szansę na podwyższenie efektywności rehabilitacji, przede wszystkim dzięki częściowemu zastąpieniu fizjoterapeutów, szczególnie w czynnościach żmudnych i powtarzalnych, oraz zmniejszeniu liczby terapeutów niezbędnej do realizacji szczególnie złożonych form rehabilitacji przez jednego pacjenta (np. w reedukacji chodu), a także zwiększeniu precyzji i powtarzalności wykonywania poszczególnych czynności (zadań funkcjonalnych) pacjenta. W rehabilitacji szpitalnej i ambulatoryjnej, dzięki dużej trwałości i łatwości utrzymania w czystości oraz konieczności zapewnienia jedynie krótkich, związanych z konserwacją przerw w pracy, możliwe jest zwiększenie dostępności i obniżenie kosztów rehabilitacji, szczególnie przy dużej liczbie pacjentów. Możliwości robotów rehabilitacyjnych rozszerza wyposażenie ich w pewną autonomię oraz sztuczną inteligencję, co zapewnia wymaganą elastyczność pracy (np. dostosowanie parametrów zabiegu do wyników jednocześnie prowadzonych badań) oraz efektywność sterowania [3, 4, 5].

Docelowo, szczególnie w ramach rehabilitacji domowej i telerehabilitacji, wykorzystanie robotów rehabilitacyjnych może stać się zasadniczą formą rehabilitacji, szczególnie w telerehabilitacji kardiologicznej czy ortopedycznej [6]. Tendencja

ta jest efektem m.in. wzrostu liczby osób niepełnosprawnych, przewlekle chorych i w podeszłym wieku, a także braku wystarczającej liczby fizjoterapeutów na pokrycie wciąż rosnących potrzeb. Wystarczy wspomnieć, że zgodnie z raportem „Polska 2030” w ciągu najbliższych 20 lat udział osób w podeszłym wieku w populacji wzrośnie do ponad 30%, dając liczbę ponad 10 mln osób, zaś liczba niepełnosprawnych Polaków i Polek już obecnie jest szacowana na 5,5 mln.

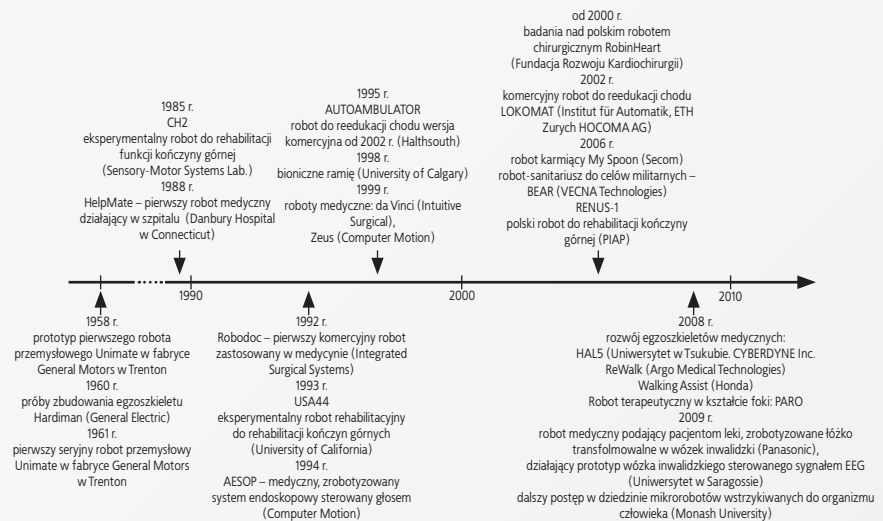
Rozwój robotyki rehabilitacyjnej następuje dwutorowo. Jednym z kierunków są badania różnego rodzaju manipulatorów, robotów i programowalnych systemów mechatronicznych od podstaw dedykowanych rehabilitacji [5]. Alternatywę stanowi adaptacja rozwiązań stosowanych w tradycyjnych robotach przemysłowych do zadań rehabilitacji ruchowej – projekt REHAROB opiera się na wykorzystaniu robota przemysłowego PUMA, podobnie jest z egzoszkielecikami wojskowymi, które po modernizacji próbują się wykorzystywać m.in. w robotyce rehabilitacyjnej (rys. 1.), [5].

Roboty stacjonarne

Dzięki przełożeniu dotychczasowej wiedzy i doświadczenia w zakresie rehabilitacji pacjentów z wybranymi schorzeniami na program robota możliwy jest indywidualny tok domowej rehabilitacji pacjenta, z uwzględnieniem wielu czynników, m.in. liczby powtórzeń ćwiczeń, siły i zakresu ruchów [4, 5]. W polskiej praktyce klinicznej najczęściej wykorzystywane są roboty rehabilitacyjne produkcji zagranicznej, takie jak Lokomat. Nad ich stosowaniem prowadzone są badania dostępne w polskiej literaturze naukowej [4, 7].

Złożoność i funkcjonalność rozwiązań z każdą generacją będzie rosła, stawiając również nowe wymagania przed lekarzami – specjalistami rehabilitacji medycznej, fizjoterapeutami i pacjentami. Należy przy tym zaznaczyć, że ilość wiedzy i praktyki do zdobycia, często od podstaw, jest ogromna – sama tylko polskojęzyczna instrukcja obsługi do systemu Lokomat 4.0 (oprogramowanie Lokocontrol wersja 4.31) liczy 162 strony, a liczba urządzeń do opanowania w różnych wersjach będzie rosła.

Stacjonarne roboty rehabilitacyjne jako urządzenia medyczne muszą być wyposażone w odpowiednie zabezpieczenia. Przestrzeganie instrukcji obsługi oraz ciągła kontrola pacjenta i działania urządzenia za pomocą panelu sterującego przez fizjoterapeutę nadzorującego zabieg stanowią podstawę bezpieczeństwa obu osób. We wspomnianym robocie rehabilitacyjnym Lokomat, uważanym obecnie za najnowocześniejszy na polskim rynku, oprócz różnego rodzaju technicznych środków bezpieczeństwa (awaryjne uwalnianie pacjenta) są stosowane urządzenia awaryjnego zatrzymywania (zarówno magnetyczno-cięglowe rozwiernie, jak i grzybkowe) – oddzielne dla obsługi i dla pacjenta. Pomaga to w rozwiązywaniu sytuacji awaryjnych, zarówno takich jak omdlenie pacjenta, jak i wynikających z eksploatacji samego robota [8].



Rys. 1. Kamienie milowe w historii robotyki rehabilitacyjnej [5]

Fig. 1. Milestones in the history of rehabilitation robotics [5]

Egzoszkielety medyczne

Egzoszkielecik (*exoskeleton*, dosłownie: szkielet zewnętrzny) to zakładany na użytkownika robot w formie kombinezonu, zbudowanego z konstrukcji metalowo-plastikowej [3, 9, 10], aktywnie wspierający lub, w przypadku poważniejszych schorzeń, zastępujący ruchy użytkownika. Wydaje się on bezpośrednim następcą i rozwinięciem funkcji wózka dla niepełnosprawnych w zakresie jego obydwu funkcji – lokomocji i podparcia ciała:

- w zakresie funkcji lokomocji zapewnia pełne wsparcie lokomocji dwunożnej użytkownika, umożliwiające aktywne zwiększenie siły oraz odciążenie układu kostno-stawowego użytkownika, istotne u osób osłabionych i powracających do zdrowia, w przypadku niektórych modeli egzoszkielecików dla wszystkich czterech kończyn, większość egzoszkielecików umożliwia wchodzenie po schodach i pochyłościach, a niektóre nawet kierowanie pojazdami mechanicznymi
- w zakresie funkcji podparcia ciała – dla pacjentów z różnymi schorzeniami oraz w różnych ich stadiach, również zastępując uszkodzone elementy układu kostnego czy nawet układu nerwowego.

Egzoszkielety nie posiadają tradycyjnego interfejsu użytkownika, rozumianego jako panel z przyciskami i wyświetlaczem. Funkcje serwisowe są realizowane najczęściej za pomocą zewnętrznego palmtopa lub netbooka podłączonego do gniazda serwisowego egzoszkieletu. Sterowanie egzoszkieletem odbywa się na podstawie:

- wzorców ruchów (chód, zmiana pozycji) oraz poszczególnych pozycji zaprogramowanych dla danego pacjenta na stałe podczas procesu dopasowywania do niego (tzw. uzbrajania) egzoszkieletu
- odczytywanych w czasie rzeczywistym danych dotyczących zamiaru użytkownika (dane z czujników elektromiograficznych oraz biometryczne o stanie zdrowia) oraz położenia poszczególnych elementów egzoszkieletu.

Ze względu na duży stopień złożoności systemów sterowania egzoszkieletem ważne jest wyposażenie go w poręczne i bezwzględnie urządzenie awaryjne zatrzymywania, dostępne również dla użytkowników niepełnosprawnych, np. poprzez dmuchnięcie czy nadęcie policzka, jak również na podstawie danych z pomiarów, np. samoczynne zatrzymanie egzoszkieletu w przypadku zaśląbnienia użytkownika wraz z powiadaniem o zdarzeniu.

Inne rozwiązania

Coraz częściej spotykane są zautomatyzowane i zrobotyzowane wózki dla niepełnosprawnych [3, 11, 12, 13]. Postęp w tej dziedzinie jest ukierunkowany na:

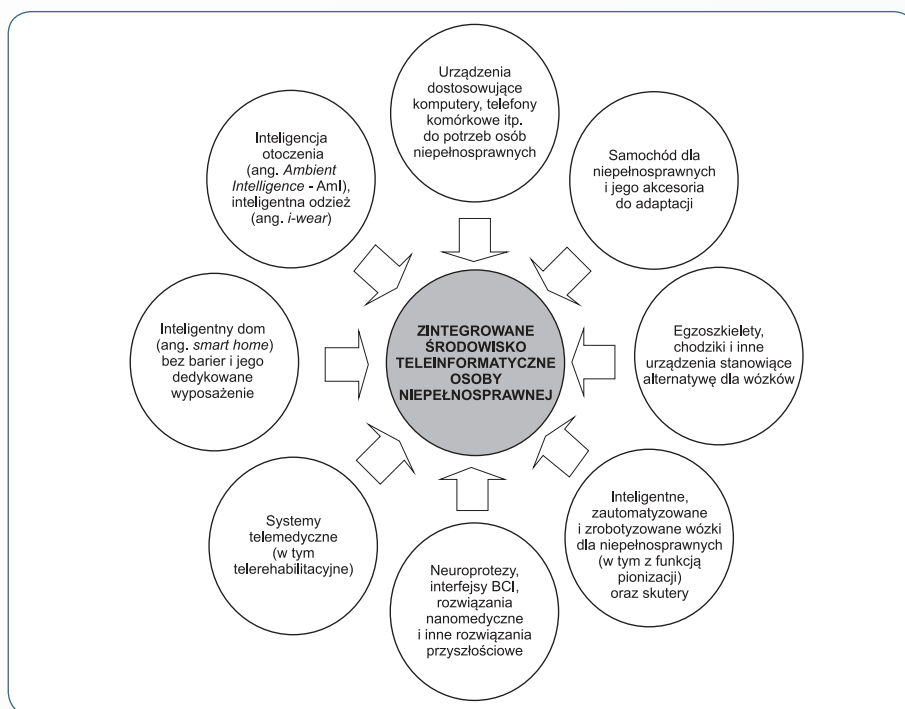
- zwiększenie możliwości mobilnych wózków przez udoskonalenie napędu, zwiększenie szybkości, czasu nieprzerwanej pracy oraz możliwości poruszania się w każdym terenie (np. wchodzenie/wjeżdżanie po schodach)
- poprawę funkcji podparcia ciała (w wózkach z funkcją pionizacji) oraz umożliwienie łatwiejszego wsiadania i wysiadania
- ewolucję systemów sterowania, zarówno tradycyjnych (różne formy joysticków i przycisków), jak i alternatywnych, dostosowanych do potrzeb osób z najcięższą chorobą lub z bardzo dużymi deficytami, sterowanych ruchami głowy, języka, oczu, a ostatnio coraz częściej głosem czy sygnałami bioelektrycznymi mózgu
- zapewnienie ograniczonej autonomii wózków dzięki systemom sterowania opartym na sztucznej inteligencji, wbudowanemu planom pomieszczeń i systemom geonawigacyjnym oraz systemom rozpoznawania i omijania przeszkód
- rozszerzenie funkcjonalności wózków o manipulatory (tzw. roboty przywózkowe) umożliwiające najczęściej realizację prostych czynności, takich jak chwytanie i trzymanie przedmiotów, podnoszenie ich i opuszczanie itp.

Główny problem zapewnienia bezpieczeństwa w eksploatacji zautomatyzowanych i zrobotyzowanych wózków dla niepełnosprawnych leży w samodzielnym wykorzystaniu ich przez użytkowników. Konieczne są bowiem okresowe kontrole, nie tylko stanu technicznego wózka, ale również bezpieczeństwa posługiwania się nim przez użytkownika i zmian wtórnych (np. odleżyn). Obecnie nie do końca wiadomo, w których kompetencjach leżą te zadania. Z technicznego punktu widzenia serwis gwarancyjny i pogwarancyjny oferują zwykle producenci, natomiast wózki zrobotyzowane, podobnie jak egzoszkielety, są właściwie nieobecne na polskim rynku i pochodzą z importu indywidualnego. Specjaliści medyczni nie zawsze są przygotowani i nie mają wiedzy technicznej, natomiast inżynierowie biomedyczni nie wchodzi w skład terapeutycznych zespołów wielodyscyplinarnych zajmujących się m.in. terapią złożonych zespołów neurologicznych. Często brakuje nawet polskiego nazewnictwa, gdyż terminy „zaopatrzenie ortopedyczne” czy „zaopatrzenie rehabilitacyjne” nie do końca oddają ideę anglojęzycznej nazwy *assistive technology*, nie mówiąc już o *cybertherapy* czy *cyberrehabilitation*. Wynika to po części z faktu, że wymagane badania naukowe (i praktyka kliniczna będąca ich praktycznym wykorzystaniem) są interdyscyplinarne i leżą na pograniczu nauk medycznych (m.in. rehabilitacji, ortopedii i traumatologii, neurologii) i technicznych (m.in. inżynierii biomedycznej, informatyki, biocybernetyki, biomechaniki). Brakuje norm i rekomendacji międzynarodowych, stanowiących odniesienie dla ich krajowych odpowiedników.

Systemy zintegrowane

Osoby niepełnosprawne, ciężko chore (również dzieci) i w wieku podeszłym, poza tzw. rehabilitacyjnymi robotami terapeutycznymi, wykorzystują również inne rozwiązania zaliczane do robotyki rehabilitacyjnej. Należą do nich zrobotyzowane wózki dla niepełnosprawnych, roboty przywózkowe, opiekuńcze czy obsługowe. Wykorzystanie znacznej części z nich może być usprawnione na zasadzie synergii za pomocą tzw. zintegrowanych środowisk osób niepełnosprawnych [7, 14, 15], (rys. 2.). Zintegrowane środowiska pozwalają na elastyczne dostosowanie komponentów do potrzeb i możliwości użytkownika, wykorzystanie wspólnej infrastruktury komunikacyjnej i sterującej, obniżenie kosztów rozwiązań kompleksowych, a w razie potrzeb – łatwiejszą modernizację i rozszerzenie funkcjonalności. Obecnie najczęściej jako rozwiązania wyjściowe przyjmuje się infrastrukturę tzw. inteligentnego domu (*smart home*) i inteligentnego ubrania (*I-wear*), a jako rozwiązanie przyszłościowe – infrastrukturę inteligentnego otoczenia (*Ambient Intelligence – Aml*).

Środowiska zintegrowane w zakresie zastosowań medycznych pozwalają na połączenie funkcji telemedycznych oraz nadzoru „w tle” nad samodzielnym funkcjonowaniem osoby niepełnosprawnej, przewlekle chorej czy w podeszłym



Rys. 2. Zintegrowane środowisko teleinformatyczne osoby niepełnosprawnej [7, 14, 15]

Fig. 2. An integrated IT environment of a person with disabilities [7, 14, 15]

wieku. Nie ulega wątpliwości, że wykorzystanie środowisk zintegrowanych zwiększa bezpieczeństwo pacjentów, zarówno w domu, jak i poza nim, a także bezpieczeństwo fizjoterapeutów i poprawia ich warunki pracy, pozwalając im lepiej wykorzystać możliwości współczesnej telemedycyny, w tym telerehabilitacji. Jednak ze względu na znaczną ingerencję w prywatność budzą one wiele dyskusji natury etycznej co do zakresu ich zastosowań i wykorzystania zgromadzonych przez nie danych. Wydaje się, że w związku z zachodzącymi obecnie przemianami społecznymi w kierunku społeczeństwa informacyjnego, warto te przemiany poprowadzić również w kierunku korzystnym dla osób niepełnosprawnych.

Bezpieczeństwo środowisk zintegrowanych dotyczy znacznie większego zakresu pojęciowego niż w poprzednio opisywanych przypadkach, bowiem stwarzają one wiele nowych zagrożeń, takich jak:

- w sferze psychicznej: dehumanizacja medycyny, wzrost poczucia nadzorowania przez maszynę, zanik potrzeby bezpośredniej komunikacji międzyludzkiej, powstanie całych zespołów chorobowych dotyczących ludzi w pułapce rzeczywistości wirtualnej
- w sferze fizycznej: przejęcie kontroli nad bazami danych pacjentów (np. biometrycznymi) w celu ich bezprawnego wykorzystania, włamania do systemów sterowania, zamachy cyberterrorystyczne na całe systemy.

Nowe rodzaje zagrożeń powodują powstanie całych gałęzi nauki zajmujących się m.in. zwalczaniem cyberterrorizmu, na który jest mniej lub bardziej podatne każde urządzenie z oprogramowaniem. Ze względu na to, że najsłabszym ogniwem bezpieczeństwa systemów

teleinformatycznych nadzwyczaj często okazuje się tzw. czynnik ludzki, szersze wykorzystanie systemów zintegrowanych będzie wymagało wnikliwego doboru personelu i stosowania wielu zabezpieczeń organizacyjno-technicznych, takich jak podwójna autoryzacja każdej operacji (tzw. *peer-review*).

Analiza zagrożeń

Efektywność i bezpieczeństwo pracy z wykorzystaniem robotów rehabilitacyjnych, muszą być oparte na rzetelnych badaniach naukowych i klinicznych, podobnie jak ma to miejsce w przypadku leków czy innych metod terapeutycznych. Korzyści wynikające z takiej formy leczenia muszą zdecydowanie przewyższać ryzyko wystąpienia efektów niepożądanych, nie mówiąc już o wykazaniu przewagi nad innymi, alternatywnymi metodami w tych samych schorzeniach i przy tym samym stanie pacjenta. Rozwiązania robotyki rehabilitacyjnej, pomimo wielu zalet, wciąż będą stanowiły źródło zagrożeń dla pacjenta i terapeuty. Większość robotów mobilnych ma mechaniczne części ruchome, oddziałujące bezpośrednio na ciało pacjenta, operując – tak jak stacjonarne roboty rehabilitacyjne – w bezpośredniej bliskości fizjoterapeuty. Dochodzi do tego ryzyko, że pacjent, szczególnie z dysfunkcją neurologiczną, może mieć zaburzone czucie i niewłaściwie odbierać bodźce, a dopiero wykorzystanie robota będzie pomocne w przywróceniu najlepszego układu nerwowego i sterowanych przez niego mięśni.

W związku z tym bardzo ważną kwestią jest właściwa wstępna diagnostyka pacjenta oraz określenie na jej podstawie parametrów

i czasu trwania poszczególnych zabiegów, a także ich monitorowanie i reagowanie na zmiany stanu zdrowia i uwagi skargi pacjenta. Nabiera to szczególnego znaczenia przy adaptacji do egzoszkieletu [8] i zrobotyzowanego wózka oraz w samodzielnym wykorzystywaniu robota w rehabilitacji domowej i telerehabilitacji. Szczegółowy instruktaż dotyczy wówczas nie tylko pacjenta, ale również jego rodziny i opiekunów (tabela).

Nie należy również zapominać, że robotyka rehabilitacyjna w dziedzinie bezpieczeństwa operatora i pacjenta może w pełni korzystać z osiągnięć pozostałych gałęzi robotyki medycznej oraz przemysłowej. Istnieje zatem potrzeba prowadzenia bazy danych nt. różnego rodzaju incydentów (od przerw w pracy aż po wypadki) z udziałem robotów medycznych i innych wraz z analizą ich przyczyn, co pozwoli uniknąć powielania się błędów w algorytmach, programach szkoleń oraz zachowaniu użytkowników. Analiza bezpieczeństwa pracy i ergonomii oraz ocena programowalnych systemów sterowania robotów rehabilitacyjnych może być wspomagana dedykowanym oprogramowaniem, w tym CAD. Wymagania w zakresie tzw. poziomów nienaruszalności bezpieczeństwa (od SIL1 do SIL3) powinny być podparte właściwą metodyką, zharmonizowane z PN-EN 62061 i/lub PN-EN ISO 13649, istniejącymi i powstającymi regulacjami UE w tym zakresie oraz wytycznymi właściwych instytucji (Urzędu Dozoru Technicznego, Agencji Oceny Technologii Medycznych).

Większość opracowań w zakresie bezpieczeństwa pracy personelu medycznego i pacjentów przy terapii z wykorzystaniem robotów rehabilitacyjnych będzie opracowaniami pionierskimi, gdyż wzorców w tym zakresie nie ma, ani w Polsce, ani za granicą.

Kierunki rozwoju wykorzystania robotów rehabilitacyjnych

Nie ulega wątpliwości, że zastosowanie robotów w rehabilitacji stanowi innowacyjną i przyszłościową metodę terapeutyczną, która już na etapie badań klinicznych przynosi wiele korzyści. Roboty te mogą być znakomitym uzupełnieniem wiedzy i doświadczenia personelu medycznego wszystkich rodzajów placówek służby zdrowia i opieki społecznej. Dodatkowo podstawowe możliwości robotów rehabilitacyjnych mogą być znacznie rozszerzane, również w kierunku:

- integracji inteligentnego środowiska: m.in. z systemem inteligentnego domu, inteligentnego ubrania czy *Ambient Intelligence*

- integracji z systemami informatycznymi funkcjonującymi w opiece zdrowotnej (szpitalne systemy informacyjne HIS, systemy informacyjne w lecznictwie otwartym), w tym w systemy teledywidualne i telerehabilitacyjne.

Wszystkie potencjalnie możliwe zagrożenia związane z wykorzystaniem robotów rehabilitacyjnych powinny być eliminowane w drodze rzetelnych badań przedklinicznych i klinicznych

Tabela. Porównanie funkcjonalności i bezpieczeństwa stacjonarnych robotów rehabilitacyjnych, egzoszkieletołów oraz zrobotyzowanych wózków dla niepełnosprawnych [4]

Table. A comparison of the functionality and safety of stationary rehabilitation robots, exoskeletons and robotic wheelchairs [4]

Parametr	Stacjonarne roboty rehabilitacyjne	Egzoszkielety	Zrobotyzowane wózki dla niepełnosprawnych
Zapewnienie terapii	+	+	–
Poprawa mobilności	–	+	+
Zastępowanie utraconych funkcji	–	+	+
Pomoc w czynnościach życia codziennego	–	+	+
Wykorzystanie pod nadzorem fizjoterapeuty	+	zależnie od zastosowania	tylko na etapie przystosowania pacjenta do wózka
Wykorzystanie samodzielne przez pacjenta	– za wyjątkiem telerehabilitacji	+	+
Wykorzystanie (wersji pediatrycznej) przez dzieci	+	w opracowaniu	+
Wyposażenie w wyłączniki awaryjne	+	+	zależnie od modelu
Wyposażenie w inne systemy bezpieczeństwa	dla pacjenta i fizjoterapeuty	zależnie od konstrukcji: awaryjne uwalnianie pacjenta itp.	zależnie od modelu
Uwagi	części ruchome robota oddziałujące na ciało pacjenta	części ruchome egzoszkieletołów oddziałujące na ciało pacjenta	w normalnej eksploatacji brak części ruchomych wózka oddziałujących na ciało pacjenta (wyjątek: roboty przywózkowe)

prowadzonych przed dopuszczeniem ich do użytku (pod nadzorem właściwych instytucji). Dodatkowym zabezpieczeniem jest rzetelne szkolenie personelu medycznego, użytkowników i ich rodzin/opiekunów, poruszające w szczególności stany awaryjne i procedury postępowania z tym związane. Warto przy tym zwrócić uwagę, że robot rehabilitacyjny jest tylko kolejnym narzędziem w rękach fizjoterapeuty czy wielodyscyplinarnego zespołu terapeutycznego i nie jest w stanie zastąpić go całkowicie [5].

Podsumowanie

Doświadczenie chirurgii, w której technologie zrobotyzowane pozwalają na mniej inwazyjne i precyzyjniejsze prowadzenie zabiegów pokazują, że robotyzacja wybranych obszarów medycyny to właściwy kierunek rozwoju. Robotyka rehabilitacyjna stanowi dziedzinę dynamicznie rozwijającą się, a liczba dostępnych na rynku robotów rehabilitacyjnych oraz prowadzonych projektów badawczych wskazuje na spodziewane dalsze zwiększenie jej udziału w liczbie realizowanych procedur medycznych. Powoduje to konieczność prowadzenia badań oraz tworzenia regulacji prawnych, norm oraz procedur klinicznych, w tym związanych z bezpieczeństwem wykorzystywania robotów rehabilitacyjnych. Obecna liczba publikacji i badań oraz regulacji prawnych z tego zakresu jest dalece niewystarczająca. Należy przy tym uwzględnić, że w robotyce rehabilitacyjnej na zagrożenia ekspozowany jest zarówno operator (najczęściej fizjoterapeuta), jak i materiał, czyli albo pacjent, albo, w części przypadków (egzoszkieletołów w rehabilitacji domowej) może być to osoba, spełniająca obie wymienione funkcje, oceniana jedynie okresowo przez fizjoterapeutę i/lub lekarza, np. w ramach telerehabilitacji.

PIŚMIENNICTWO

- [1] Medical Robotics Database (MeRoDA)
<http://www.umm.uni-heidelberg.de/apps/ortho/meroda/>, 01.08.2011
- [2] PubMed (U.S. National Library of Medicine)
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed>
- [3] E. Mikołajewska, D. Mikołajewski *Zastosowania automatyki i robotyki w wózkach dla niepełnosprawnych i egzoszkieletołów medycznych*. „Pomiary Automatyka Robotyka” 5/2011, 58-64
- [4] E. Mikołajewska *Lokomat jako element nowoczesnej reedukacji chodu*. „Praktyczna Fizjoterapia i Rehabilitacja”, 10/2010
- [5] E. Mikołajewska, D. Mikołajewski *Roboty rehabilitacyjne*. „Rehabilitacja w Praktyce” 4/2010
- [6] E. Mikołajewska, D. Mikołajewski *Telerehabilitacja*. „Rehabilitacja w Praktyce” 2011;1:64-67
- [7] E. Żak, J. Durmała, G. Sobota i wsp. *Trening z zastosowaniem zautomatyzowanej ortozy u dziecka z diplegią po użyciu toksyny botulinowej – studium przypadku*. „Acta Bio-Optica et Informatica Medica” 16 (3)2010
- [8] H. Schmidt, S. Hesse, R. Bernhardt *Safety concept for robotic gait trainers*. “Conference Proceedings – IEEE Engineering in Medicine and Biology Society” 4/2004
- [9] E. Mikołajewska, D. Mikołajewski *Exoskeletons in neurological diseases – current and potential future applications*. “Advances in Clinical and Experimental Medicine” 20 (2)2011
- [10] E. Mikołajewska, D. Mikołajewski *Egzoszkieletołów jako szczególna forma robota – zastosowania cywilne i wojskowe*. „Kwartalnik Bellona” 1/2011
- [11] E. Mikołajewska, D. Mikołajewski *Automatyzacja wózków dla niepełnosprawnych*. „Acta Bio-Optica et Informatica Medica” 1/2010
- [12] S. W. Brose, D. J. Weber, B. A. Salatin *The role of assistive robotics in the lives of persons with disability*. “American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation” 89 (6)2010
- [13] R. C. Simpson, E. F. LoPresti, R. A. Cooper *How many people would benefit from a smart wheelchair?* “Journal of Rehabilitation Research and Development” 45 (1)2008
- [14] E. Mikołajewska, D. Mikołajewski *E-learning in the education of people with disabilities*. “Advances in Clinical and Experimental Medicine” 20 (1)2011
- [15] E. Mikołajewska, D. Mikołajewski *Wheelchair development from the perspective of physical therapists and biomedical engineers*. “Advances in Clinical and Experimental Medicine” 19 (6)2010