

Emilia Mikołajewska

Klinika Rehabilitacji, 10 Wojskowy Szpital Kliniczny z Polikliniką SP ZOZ w Bydgoszczy

Dariusz Mikołajewski

Instytut Mechaniki i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy

Katedra Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu

Możliwości wykorzystania egzoszkieletu medycznego jako nowoczesnej formy terapii

Streszczenie:

Wzrost liczby osób niepełnosprawnych, przewlekle chorych i w podeszłym wieku oraz zwiększenie świadomości społecznej w tym zakresie stwarzają konieczność ciągłego podwyższania jakości życia w tych grupach osób. Ograniczone zasoby finansowe oraz brak możliwości skokowego zwiększenia liczby specjalistów w różnych dziedzinach medycyny powodują zwrot w stronę rozwiązań technicznych. Do najciekawszych należą egzoszkielety – konstrukcje mechaniczno-elektryczne, zakładane na użytkownika na podobieństwo kombinezonu i mocowane do poszczególnych części jego ciała w celu wspomaganie ruchu przez efekторы (np. siłowniki) egzoszkieletu. Uwagę naukowców i klinicystów przyciągają szerokie możliwości wykorzystania egzoszkieletu w rehabilitacji i opiece nad pacjentami, zarówno przez personel medyczny (w trybie wsparcia), jak i przez samych pacjentów (w trybie rehabilitacyjnym). Celem pracy jest ocena obecnych możliwości wykorzystania technologii egzoszkieleatów w zastosowaniach medycznych, ze szczególnym uwzględnieniem warunków polskich, oraz nakreślenie perspektyw terapeutycznego wykorzystania egzoszkieleatów w naszym kraju.

Słowa kluczowe: rehabilitacja, inżynieria biomedyczna, roboty rehabilitacyjne, egzoszkielety, osoby niepełnosprawne, pacjenci z deficytami neurologicznymi

Possibilities of using medical exoskeleton as a modern form of therapy

Summary:

An increase in the number of persons with disabilities, chronic patients, the elderly, as well as the increase in social awareness in this field, result in the pressure on the constant improvement of the quality of life in the groups mentioned above. The limited financial resources and the lack of the abrupt increase in the number of medical professionals lead to the turning towards technical solutions. The most interesting ones include exoskeletons, mechanical and electrical constructions worn like a suit by the individual and attached over various parts of the body to support its movement by its effectors (eg. actuators). The attention of scientists and clinicians is attracted by a wide range of possibilities of using exoskeleton in rehabilitation and care of patients, both by a medical personnel (in the mode of support) and by the patients themselves (in the mode of rehabilitation). The aim of this study is to evaluate current possibilities of using exoskeleton technology in medical applications, with particular attention to Polish conditions, as well as to outline the perspectives of therapeutic use of exoskeletons in our country.

Keywords: rehabilitation, biomedical engineering, rehabilitation robots, exoskeletons, persons with disabilities, patients with neurological deficits

Wprowadzenie

Rozwój technologiczny otwiera szereg nowych, niespotykanych wcześniej możliwości. Przywracanie funkcji ruchowych oraz poznawczych pacjenta wymaga wykorzystywania coraz bardziej zaawansowanych technologii, znacznie zwiększających możliwości lekarzy, fizjoterapeutów, inżynierów biomedycznych i innych specjalistów w ramach diagnostyki, leczenia, rehabilitacji oraz gromadzenia wiedzy i wnioskowania z niej, w celu poprawienia dotychczas wykorzystywanych metod i technik terapeutycznych¹.

Obecnie tradycyjne stacjonarne roboty rehabilitacyjne, wyposażone w możliwość adaptacji zadań powtarzalnych (ang. *repetitive tasks*), mogą być, w miarę potrzeb, zastępowane przez urządzenia wymagające interakcji i współpracy układu człowiek-maszyna (tu: pacjent-robot) (ang. *human-robot interaction* – HRI), zarówno w obszarze czysto fizycznym, jak i w poznawczym (np. interfejsy dotykowe, sztuczne biologiczne sprzężenie zwrotne – biofeedback)². Jednym z możliwych rozwiązań są egzoszkielety. Egzoszkielet (dosł. szkielet zewnętrzny, ang. *exoskeleton*, spotyka się również nazwę kombinezon wspomagany, ang. *power suit*, robot noszony, ang. *wearable robot*) stanowi szczególną formę robota. Jest on konstrukcją mechaniczno-elektryczną, zakładaną na użytkownika na podobieństwo kombinezonu i mocowaną do poszczególnych części jego ciała w celu wspomagania ruchu użytkownika przez efekторы (np. siłowniki) egzoszkieletu. Z powyższej definicji wynikają interesujące możliwości wykorzystania egzoszkieletu w rehabilitacji i opiece nad pacjentami, zarówno przez personel medyczny (w trybie wsparcia, ang. *assistive mode*), jak i przez samych pacjentów (w trybie rehabilitacyjnym, ang. *rehabilitative mode*), które zostaną szerzej omówione w dalszej części pracy.

Sam pomysł egzoszkieletu nie jest nowy. Za inspirację dla naukowców w tym zakresie uważa się rozwiązania opisane w książce Roberta A. Heinleina *Starship Troopers (Żołnierze kosmosu)* z 1959 r. W latach powojennych ośrodki badawcze pracujące nad egzoszkielecikami znajdowały się po obu stronach żelaznej kurtyny: zarówno w USA i Europie Zachodniej, jak również w ZSRR i byłej Jugosławii. Do najlepszych rezultatów doszli specjaliści z General Electric, którzy w latach 60-tych XX wieku swój prototyp egzoszkieletu Hardiman zakończyli, z powodu ograniczeń technicznych, na etapie gotowego ramienia. Do doświadczeń tych powrócono dopiero pod koniec lat 90-tych XX wieku, gdy wykorzystaniem egzoszkielecików zainteresowała się Agencja Zaawansowanych Obronnych Projektów Badawczych Departamentu Obrony Stanów Zjednoczonych (ang. *Defense Advanced Research Projects Agency* – DARPA). Efektem jej wysiłków są dwa programy badawcze:

- „Exoskeletons for human performance augmentation” (EHPA), realizowany w latach 2001–2007,
- „Army program executive office soldier” (PEO Soldier), realizowany od 2008 r.

¹ *Converging clinical and engineering research on neurorehabilitation*, red. J. L. Pons, D. Torricelli, M. Pajaro, Heidelberg-New York, Springer, 2013

² E. Rocon, J. L. Pons, *Exoskeletons in rehabilitation robotics*, Heidelberg-New York, Springer, 2011

W ich wyniku powstał amerykański egzoszkielet wojskowy, stworzony przez Sarcos Research Corporation. Stymuluje to badania nad egzoszkieletami na całym świecie. Jako efekty uboczne badań wojskowych, lub całkowicie niezależnie od nich, zaczęły powstawać egzoszkielety dedykowane innym obszarom użytkowania, w tym zastosowaniom medycznym. Celem pracy jest ocena obecnych możliwości wykorzystania technologii egzoszkieletów w medycynie, ze szczególnym uwzględnieniem polskich warunków, oraz nakreślenie perspektyw terapeutycznego wykorzystania egzoszkieletów w naszym kraju.

Wykorzystanie ruchu wspomaganego w rehabilitacji

Zamiar wykonania ruchu powoduje odpowiednią modulację wzorców aktywności poszczególnych mięśni. Wykonanie każdego z zadań funkcjonalnych, w zależności m. in. od stanu poszczególnych mięśni w momencie rozpoczęcia ruchu, warunków zewnętrznych, obciążenia oraz wypracowanego planu ruchu, wymaga wykorzystania różnego zestawu wzorców, w odmiennych sekwencjach, z różną siłą oraz kierunkiem działania. U osób z uszkodzeniami w obrębie układu sterowania ruchem któryś ze wspomnianych wyżej etapów jest zakłócony, co powoduje ograniczenie lub całkowity brak możliwości wykonania ruchu. Egzoszkielet, rozpoznając zamiar ruchu użytkownika oraz wspomagając jego wykonanie, może uzupełnić lub, w części przypadków, zastąpić ten deficyt. Co ważne – każdy człowiek (potencjalny użytkownik egzoszkieletu) dysponuje ograniczonym zasobem naturalnych (lub zbliżonych do naturalnych) wzorców ruchu, co umożliwi ich przejęcie, identyfikację oraz wstępne zaprogramowanie w egzoszkielecie. W ten sposób dotychczasowe idee ruchu wspomaganego oraz ćwiczeń powtarzalnych (ang. *repetitive exercises*) zyskują ultranowoczesną formę realizacji (rysunek 1, rysunek 2).

Podejście tradycyjne (ang. *bottom-up*)

Oddziaływanie na kończyny (lub inne części ciała na tzw. „obwodzie”) w celu pobudzenia plastyczności mózgu

- metody neurofizjologiczne (NDT-Bobath, PNF i inne),
- uczenie motoryczne (Integracja sensoryczna i inne),
- ich kombinacje.

Podejście integracyjne (ang. *top-down*)

Stymulacja plastyczności mózgu kieruje powrotem funkcji

- roboty rehabilitacyjne,
- egzoszkielety,
- funkcjonalna stymulacja elektryczna (FES),
- nieinwazyjne interfejsy mózg-komputer (BCI).

Podejście mieszane

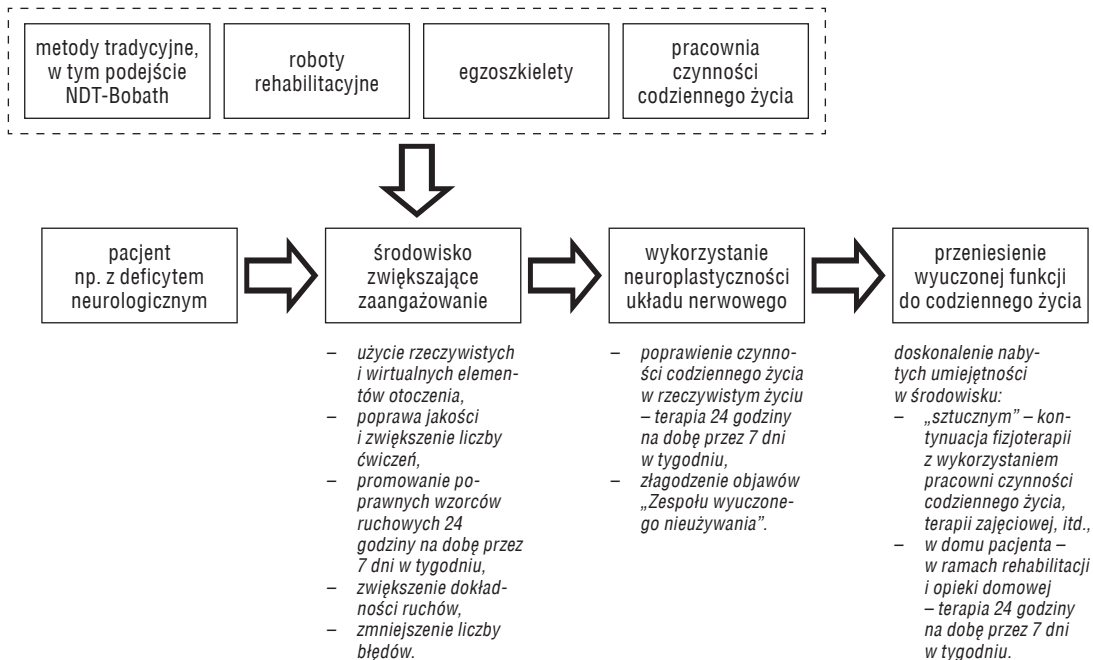
Odpowiednio dobrana kombinacja oddziaływań daje lepsze rezultaty niż oddziaływanie jedynie jedną metodą

Indywidualny, zorientowany na pacjenta dobór elementów z podejścia tradycyjnego oraz podejścia integracyjnego.

Rozwój podejścia eklektycznego.

We wszystkich podejściach: współdziałanie z procesem samozdrowienia (ang. *spontaneous recovery*)

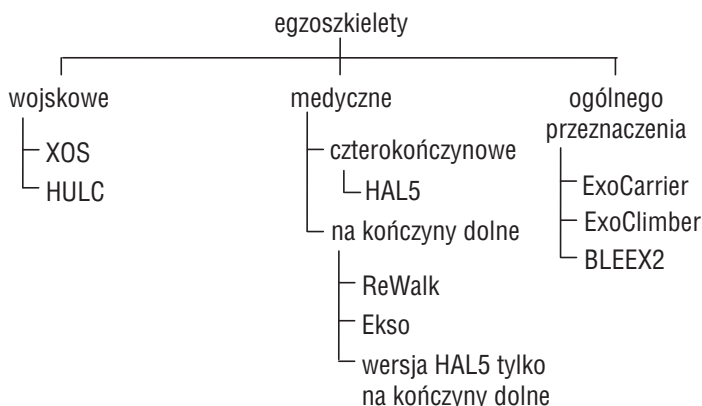
Rysunek 1. Podejścia do usprawniania funkcjonalnego w rehabilitacji. Źródło: J. M. Belda-Lois, S. Mena-del-Horno, I. Bermejo-Bosch i in., Rehabilitation of gait after stroke: a review towards a top-down approach, „J Neuroeng Rehabil” 2011, Nr 8, s. 66; E. Mikołajewska, D. Mikołajewski, ReoAmbulator jako nowoczesne narzędzie w reedukacji chodu, „Praktyczna Fizjoterapia i Rehabilitacja” 2012, Nr 31, s. 49–51; E. Mikołajewska, Eclectic approach as the natural way of development in neurological rehabilitation of adults, „International Journal on Disability and Human Development”, doi 10.1515/ijdh-2012-0103; E. Mikołajewska, Znaczenie podejścia eklektycznego we współczesnej fizjoterapii, „Praktyczna Fizjoterapia i Rehabilitacja” 2012, Nr 33, s. 26–27



Rysunek 2. Idea wykorzystania robotów rehabilitacyjnych w ramach rehabilitacji neurologicznej.

Źródło: 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

Egzoszkielety medyczne mogą w istotny sposób przyczynić się do odzyskania albo zastąpienia utraconych lub ograniczonych funkcji motorycznych, poprawiając samodzielność i jakość życia użytkownika-pacjenta. Miejsce egzoszkieletów medycznych w ramach wspólnych rozwiązań tego typu przedstawia rysunek 3.



Rysunek 3. Klasyfikacja najważniejszych współczesnych egzoszkieletów (wariant, opracowanie własne)

Znaczenie egzoszkieletów jest bardzo duże na tle dotychczas stosowanych rozwiązań – ilustruje to tabela 1. Egzoszkielety nie tylko łączą funkcje:

- wózka (podparcie ciała pacjenta, zwiększenie możliwości lokomocyjnych)
- i robota rehabilitacyjnego (usprawnianie w ruchu, z zachowaniem powtarzalności naturalnych lub zbliżonych do naturalnych wzorców chodu, brak zmęczenia terapeutę, zwiększenie motywacji pacjenta),

ale dodają do nich nowe wymiary: terapię niemalże 24 godziny na dobę, 7 dni w tygodniu, podczas normalnego, codziennego funkcjonowania, z zachowaniem mobilności dwunożnej (wchodzenie po schodach i pochyłościach, w tzw. terenie trudnym lub w wąskich przejściach) i pełnego wsparcia w każdej pozycji (stanie, siedzenie, leżenie, zmiany pozycji, aż po schyłanie się, a może nawet kucanie). Dopasowanie egzoszkieletu pozwala zachować normalną postawę ciała, a postęp technologiczny i miniaturyzacja poszczególnych elementów być może pozwoli ukryć to urządzenie pod ubraniem. Będzie to za sobą niosło brak jednoznacznego (np. poprzez korzystanie z wózka) wyróżniania się wyglądem osób niepełnosprawnych, co ma istotny wymiar społeczny, sprzyjający lepszej integracji jednostek z dysfunkcjami ze społeczeństwem, wyrównaniu ich szans na naukę i pracę.

Tabela. 1. Porównanie różnych rozwiązań w obszarze robotyzacji

Funkcjonalność	Rozwiązanie		
	Egzoszkielety	Zrobotyzowane wózki dla osób niepełnosprawnych	Stacjonarne roboty rehabilitacyjne
Wyposażenie indywidualne pacjenta	+	-	jedynie w ramach telerehabilitacji
Funkcja terapeutyczna	+	-	+
Funkcja zastępowania utraconych funkcji	+	+	-
Poprawa mobilności	+	+	-
Pomoc w czynnościach codziennego życia	+	+	-
Wersje dedykowane określonym typom pacjentów	Wersje: dla pacjentów z hemiplegią i pediatryczna – w opracowaniu	Indywidualny dobór, modelu, wymiarów oraz akcesoriów w zależności od stanu zdrowia, wieku, możliwości i potrzeb pacjenta itp.	Wersje pediatryczne

Źródło: E. Mikołajewska, D. Mikołajewski, Exoskeletons in neurological diseases – current and potential future applications, „Advances in Clinical and Experimental Medicine” 2011, Nr 2, s. 227–233

Z klinicznego punktu widzenia egzoszkielety, jako urządzenia rehabilitacyjne, stwarzają zupełnie nowe możliwości, wpisując się w dotychczasowy model rehabilitacji. Trzeba pamiętać, że już dotychczasowe wykorzystanie robotów rehabilitacyjnych niosło ze sobą szereg zalet:

- zmniejszenie pracochłonności i czasochłonności poszczególnych ćwiczeń, szczególnie wymagających do tej pory jednoczesnego udziału więcej niż jednego terapeutę, np. w reedukacji chodu,

- zapewnienie pełnej powtarzalności pojedynczych ruchów i/lub ich sekwencji, jak również automatyzacja planowania i doboru parametrów całych sesji terapeutycznych,
- jednoczesne obrazowanie i analizę wyników pacjenta, ułatwiające wprowadzenie korekt w planie terapii,
- zwiększenie motywacji pacjenta, często z wykorzystaniem prostych gier lub środowisk rzeczywistości wirtualnej (ang. *Virtual Reality* – VR),
- zmniejszenie ryzyka popełnienia błędu przez personel medyczny lub pacjenta,
- trwałość, bezawaryjność i łatwość utrzymania robota w czystości (por. tabela 2).

Kliniczne wykorzystanie egzoszkieletów pozwala na dalsze rozwinięcie modelu wykorzystania robotyki rehabilitacyjnej w kierunku rehabilitacji i opieki domowej (w tym odciążenia i wsparcia rodziny/opiekunów pacjenta, o których często się zapomina) oraz telerehabilitacji. Nie można jednak ulegać złudnemu przekonaniu, że roboty są w stanie w sposób efektywny zastąpić personel medyczny w opiece np. nad starzejącym się społeczeństwem. Ograniczenia elastyczności oprogramowania robotów oraz ich autonomii, powodowane również koniecznością zapewnienia bezpieczeństwa pacjenta, terapeuty i ich otoczenia³, jak również groźba dehumanizacji medycyny (m. in. poprzez brak kontaktu pacjenta z żywym terapeutą) czynią roboty rehabilitacyjne jedynie użyteczną, uzupełniającą formą terapii. Wydaje się, że w części zastosowań, w tym w rehabilitacji neurologicznej, nic nie zastąpi „oka i ręki” doświadczonego terapeuty – zbyt duża jest bowiem złożoność terapii i za wiele czynników wpływa na ostateczny jej kształt oraz dynamikę zmian.

Tabela 2. Wady i zalety wykorzystania egzoszkieletów w rehabilitacji

Zalety	Wady
<ul style="list-style-type: none"> – Alternatywa dla wózka dla osób niepełnosprawnych, rozszerzająca jego funkcje m. in. o wchodzenie po schodach. – Wsparcie różnych czynności codziennego życia. – Możliwe częściowe dynamiczne odciążenie oraz zmniejszenie kosztu energetycznego – np. w przypadku osłabień. – Możliwość kompensacji (również tymczasowej) deficytów układu nerwowego. – Możliwość dopasowania systemu sterowania do rodzaju i stopnia deficytu. – Możliwość sterowania za pomocą interfejsu mózg-komputer (por. projekt <i>MindWalker</i>). – Możliwość wykorzystania egzoszkieletu jako platformy dla systemów teledywidualnych lub zintegrowanych w większe środowiska. 	<ul style="list-style-type: none"> – Konieczność doboru indywidualnego. – Złożone procedury dopasowania i uzbrajania egzoszkieletu oraz szkolenia użytkownika i jego rodziny/opiekunów. – Konieczność wypracowania wskazań i przeciwwskazań. – Konieczność wdrożenia rozwiązań technicznych i procedur awaryjnych oraz podwyższających bezpieczeństwo pacjenta/użytkownika oraz jego otoczenia, w tym terapeutów i rodziny/opiekunów. – Nie do końca zbadane skutki długoterminowego użytkowania.

Źródło: E. Mikołajewska, D. Mikołajewski, The movement of a human being in the medical exoskeleton – the anthropomorphic aspects, „Antropomotoryka” 2012, Nr 57, s. 115–121

³ E. Mikołajewska, D. Mikołajewski, *Bezpieczeństwo pracy z robotami rehabilitacyjnymi*, „Bezpieczeństwo Pracy” 2012, Nr 2, s. 9–11

Budowa egzoszkieletu

Dotychczasowe prace badawczo-konstrukcyjne nad egzoszkieletemi medycznymi szły w dwóch kierunkach:

- adaptacji istniejących rozwiązań (głównie egzoszkieletoów projektowanych pod kątem zastosowań militarnych i ratowniczych) do celów medycznych,
- opracowaniu od podstaw rozwiązań przeznaczonych tylko i wyłącznie do zastosowań medycznych.

Egzoszkielety są projektowane i konstruowane z uwzględnieniem kształtu oraz funkcji wspomaganych części ciała człowieka. Dotyczy to zarówno rozmiarów i ciężaru poszczególnych części, jak i zapewnienia odpowiedniej ruchomości w poszczególnych stawach (tzw. liczba stopni swobody) itp. Zakres zastosowań egzoszkieletoów stopniowo się rozszerza: od prostego zwielokrotnienia siły aż po zastępowanie niesprawnych mięśni i całych kończyn oraz wykorzystanie ich w telerehabilitacji. Nie do końca jest jeszcze zbadany potencjał egzoszkieletoów w zakresie badania neuronalnych korelatów planowania ruchu i sterowania nim oraz wsparcia upośledzonej kontroli motorycznej pacjentów⁴. Wymaga to uwzględnienia:

1. fizycznej interakcji człowiek-robot (*physical HRI* – pHRI) – zapewnienia użytkownikowi (pacjentowi) świadomości możliwości i rezerw tkwiących w egzoszkielecie przy jednoczesnym ciągłym utrzymaniu nad nim kontroli,
2. poznawczej interakcji człowiek-robot (ang. *cognitive HRI* – cHRI) – generacji uzupełniających sił wspomagających zamiar użytkownika (również: poprzez częściowe dynamiczne odciążenie) oraz umożliwiających mu wspomaganie/uzupełnianie pokonywanie własnych ograniczeń⁵.

HAL 5 (*Hybrid Assistive Limb version 5*) jest czterokończynowym (choć dostępna jest również wersja tylko na kończyny dolne) egzoszkieletem medycznym, produkowanym przez japońską firmę Cyberdyne Inc. we współpracy z Uniwersytetem w Tsukubie⁶ (rysunek 4). Przy masie własnej 23 kg zapewnia autonomiczność 2 godziny 40 minut, zarówno w pomieszczeniach, jak i na zewnątrz. Jako jedyny egzoszkielec medyczny umożliwia wspomaganie podnoszenie ciężkich przedmiotów. Konsultacji lekarskiej przy korzystaniu z HAL-a wymagają nadciśnienie, osteoporoza oraz choroby serca, natomiast zdecydowanie, jako przeciwwskazania, wymienia się wszczepiony rozrusznik serca oraz ciążę. Co ciekawe – egzoszkielec ten można wypożyczyć, a w ramach programu HAL FIT firma oferuje możliwość skorzystania z sesji terapeutycznych z egzoszkieletem zarówno osobom chorym, jak i zdrowym.

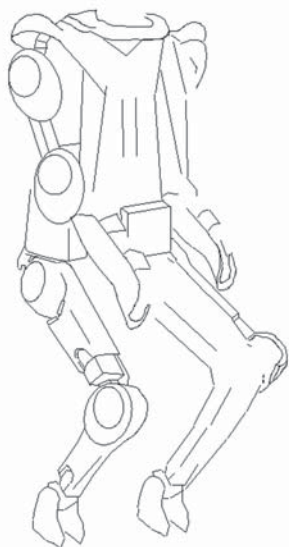
⁴ J. L. Pons, *Wearable robots: biomechatronic exoskeletons*, Hoboken, John Wiley & Sons, 2008

⁵ E. Rocon, J. L. Pons, *Exoskeletons in rehabilitation robotics*, Heidelberg-New York, Springer, 2011

⁶ Strona internetowa firmy Cyberdyne Inc. <http://www.cyberdyne.jp/english/>[data pobrania: 01.12.2012]

ReWalk jest egzoszkieletem medycznym na kończyny dolne, produkowanym przez izraelską firmę Argo Medical Technologies (rysunek 5)⁷, wymagającym przez użytkownika użycia kul. Jako przeciwwskazania, oprócz braku możliwości wsparcia się o kulach, wymieniane są schorzenia układu krążenia i łamliwość kości. Ograniczenie stanowi również dopuszczalny wzrost użytkownika w zakresie 1,6–1,9 m oraz waga ciała do 100 kg. Jest to jedyny egzoszkielec medyczny, w którym można kierować samochodem.

Ekso to amerykański egzoszkielec medyczny, produkowany przez firmę Ekso Bionics⁸, wprowadzony na rynek w 2012 r. (rysunek 6). Podobnie, jak ReWalk, wymaga użycia kul.



Rysunek 4. Egzoszkielec HAL5



Rysunek 5. Egzoszkielec ReWalk



Rysunek 6. Egzoszkielec Ekso

Źródło: Opracowanie własne na podstawie dokumentacji i zdjęć sprzętu.

Cykl sterowania egzoszkieletem

Podstawę działania systemu sterowania (najczęściej zdublowanego) egzoszkieletu stanowi odczyt zamiaru użytkownika w oparciu o zestawy czujników: obciążenia, przyśpieszenia, kątów w stawach, żyroskopowe, elektromiograficzne i inne, według potrzeb. Sterowanie powinno zapewnić:

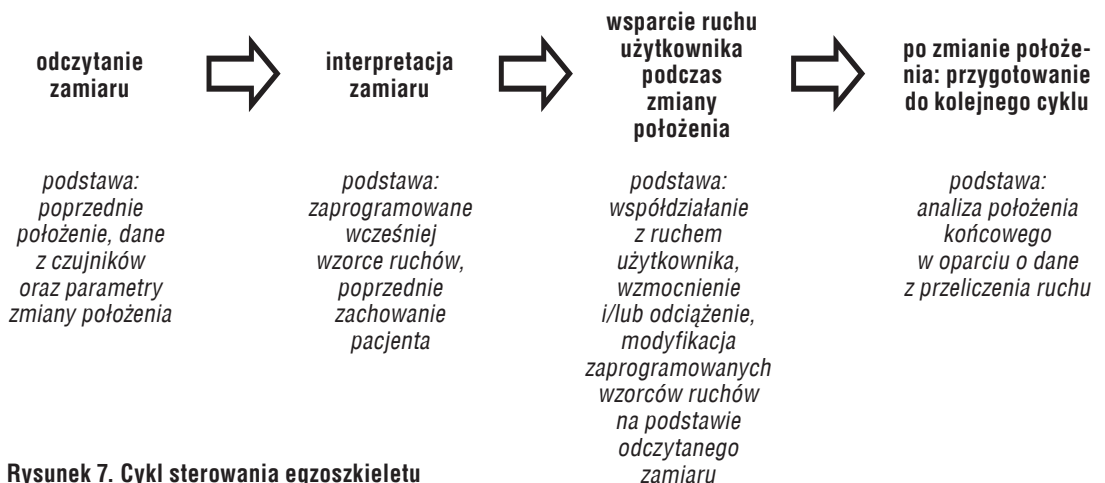
⁷ Strona internetowa firmy Argo Medical Technologies <http://rewalk.com>, [data pobrania: 01.12.2012]; G. Zeilig, H. Weingarden, M. Zwecker, *Safety and tolerance of the ReWalk exoskeleton suit for ambulation by people with complete spinal cord injury: A pilot study*, „J Spinal Cord Med” 2012, Nr 2, s. 96–101

⁸ Strona internetowa firmy Ekso Bionics: <http://www.eksobionics.com>, [data pobrania: 01.12.2012]

- płynne przechodzenie pomiędzy kolejnymi położeniami egzoszkieletu, z założonym wspomaganie i/lub zastępowaniem funkcji,
- utrzymanie zaprogramowanych wzorców (chodu, poszczególnych pozycji i innych, według potrzeb) w obrębie wzorców zbliżonych do naturalnych dla danego pacjenta,
- wygodę użytkownika umożliwiającą jego wielogodzinną, codzienną eksploatację, bez nadmiernego zmęczenia, szkodliwych zmian wtórnych oraz nabycia niewłaściwych wzorców⁹.

W funkcjonowaniu egzoszkieletu przenikają się elementy biomechaniczne i biocybernetyczne. Pełne wyjaśnienie współdziałania układu człowiek-komputer wciąż stanowi wyzwanie dla badaczy. Pacjent, po wstępnym treningu i dopasowaniu egzoszkieletu do jego potrzeb, intuicyjnie współdziała z egzoszkieletem w ramach interakcji człowiek-maszyna. System sterowania egzoszkieletem, dzięki czujnikom, adaptacyjnie dostosowuje się do użytkownika w ten sposób, że może być przez niego odbierany jako „przedłużenie ciała”. Użytkownik steruje zatem właściwie dobranym egzoszkieletem w ramach realizacji wszystkich funkcji ruchowych, zarówno tych zachowanych, jak i tych ograniczonych (wspomaganych, uzupełnianych lub zastępowanych przez egzoszkielec). Ze wspomnianego intuicyjnego sterowania wynika brak potrzeby posiadania przez egzoszkielec dedykowanego użytkownikowi interfejsu – jest nim przecież sam użytkownik. Oczywiście znaczna część egzoszkieleatów posiada interfejs, jednak służy on przede wszystkim wyborowi trybów pracy czy funkcji serwisowych, a nie bezpośrednio sterowaniu ruchem egzoszkieletu.

Cykl pracy egzoszkieletu obejmuje cztery główne etapy realizowane w czasie rzeczywistym. Zostały one przedstawione na rysunku 7.



Rysunek 7. Cykl sterowania egzoszkieletem

Źródło: Opracowanie własne.

⁹ E. Mikołajewska, D. Mikołajewski, *The movement of a human being in the medical exoskeleton – the anthropomotoric aspects*, „Antropomotoryka” 2012, Nr 57, s. 115–121

Obliczeniowa realizacja wspomnianego cyklu jest oparta o tzw. procesory mięśniowe (ang. *myoprocessor*), realizowane w czasie rzeczywistym jako modele pracującego mięśnia równoległe (z nieznacznym wyprzedzeniem) z jego rzeczywistym działaniem. Wyliczenia te służą wyprzedzającemu planowaniu parametrów całych sekwencji aktywacji mięśni koniecznych do wykonania ruchu wynikającego z zamiaru użytkownika¹⁰. Powiązanie tych obliczeń z zaprogramowanymi wcześniej wzorcami poszczególnych czynności (chodu, poszczególnych pozycji) umożliwi nie tylko wierne naśladowanie przez mechanizm egzoszkieletu ruchów jego użytkownika, ale przede wszystkim wyprzedzanie ich, połączone ze wspomaganie siły mięśni wymagających takiej pomocy.

Wydaje się, że obecnie najpopularniejszym rozwiązaniem w układach sterowania egzoszkieletołów jest proporcjonalna kontrola mioelektryczna (ang. *proportional mioelectric control*)¹¹, w której siły przypisywane w układzie sterowania poszczególnym mięśniom są proporcjonalne do amplitud odpowiadających im sygnałów EMG. Wykorzystuje się również logikę rozmytą, jak np. regulator neuronowo-rozmyty (ang. *neuro-fuzzy controller*)¹², jako rozwiązania łatwo adaptujące się do sygnałów elektromiograficznych, pobieranych od użytkownika egzoszkieletu.

Problemy wymagające dalszych badań w obszarze układów sterowania stanowią obecnie przede wszystkim:

- wykorzystanie w obliczeniach coraz bardziej realistycznych modeli mięśni – obecnie wykorzystuje się np. model wg Hilla (ang. *Hill phenomenological muscle model*),
- sterowanie pojedynczym mięśniem, szczególnie przy istnieniu mięśni synergistycznych, wymagających współdziałania w synchronizacji¹³,
- optymalizacja siły tych samych i różnych grup mięśniowych w odmiennych zastosowaniach¹⁴,

¹⁰ E. E. Cavallaro, J. Rosen, J. C. Perry i in., *Real-time myoprocessors for a neural controlled powered exoskeleton arm*, „IEEE Trans Biomed Eng” 2006, Nr 11, s. 2387–2396

¹¹ D. P. Ferris, C. L. Lewis, *Robotic lower limb exoskeletons using proportional myoelectric control*, „Conference Proceedings of the International Conference of IEEE Engineering in Medicine and Biology Society” 2009, s. 2119–2124; H. B. Evans, Z. Pan, P. A. Parker i in., *Signal processing for proportional myoelectric control*, „IEEE Trans Biomed Eng” 1984, Nr 2, s. 207–211; E. Mikołajewska, D. Mikołajewski, *The movement of a human being in the medical exoskeleton – the anthropomotoric aspects*, „Antropomotoryka” 2012, Nr 57, s. 115–121

¹² C. Fleischer, A. Wege, K. Kondak i in., *Application of EMG signals for controlling exoskeleton robots*, „Biomed Tech (Berl)” 2006, Nr 5–6, s. 314–319; K. Kiguchi, Y. Imada, M. Liyanage, *EMG-based neuro-fuzzy control of a 4DOF upper-limb power-assist exoskeleton*, „Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc” 2007, s. 3040–3043

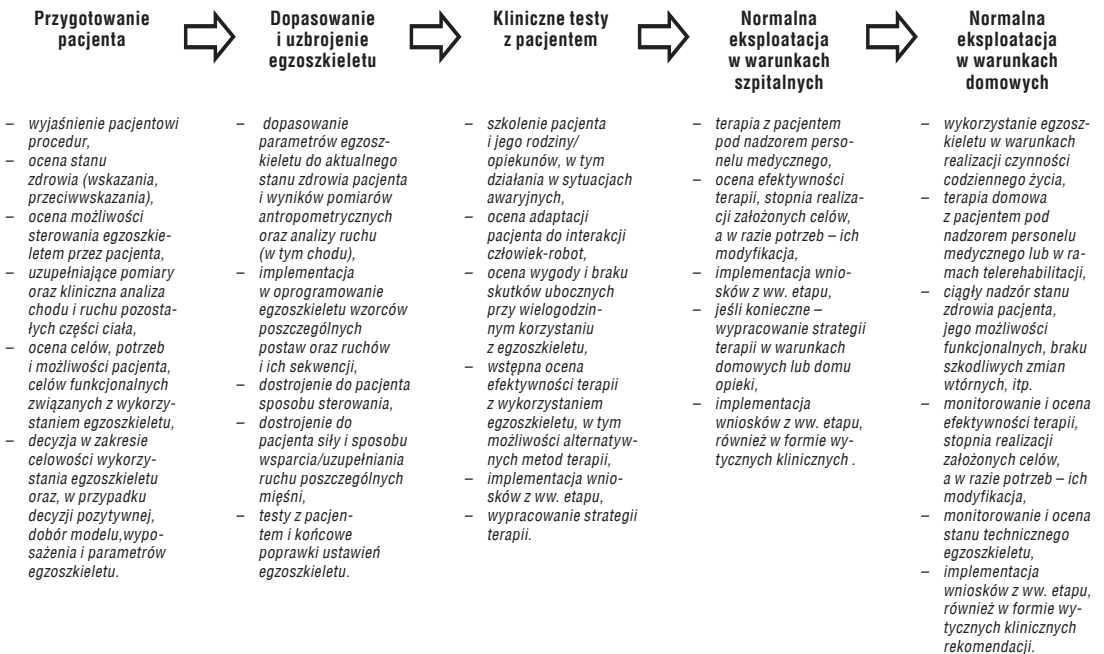
¹³ N. Jarrassé, M. Tagliabue, J. V. Robertson i in., *A methodology to quantify alterations in human upper limb movement during co-manipulation with an exoskeleton*, „IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng” 2010, Nr 4, s. 389–397; E. Mikołajewska, D. Mikołajewski, *The movement of a human being in the medical exoskeleton – the anthropomotoric aspects*, „Antropomotoryka” 2012, Nr 57, s. 115–121

¹⁴ S. Heintz, E. M. Gutierrez-Farewik, *Static optimization of muscle forces during gait in comparison to EMG-to-force processing approach*, „Gait Posture” 2007, Nr 2, s. 279–288; R. A. Bogey, J. Perry, A. J. Gitter, *An EMG-to-force processing approach for determining ankle muscle forces during normal human gait*, „IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng” 2005, Nr 13, s. 302–310; E. Mikołajewska, D. Mikołajewski, *The movement of a human being in the medical exoskeleton – the anthropomotoric aspects*, „Antropomotoryka” 2012, Nr 57, s. 115–121

- odruchowa redukcja siły człowieka w układzie człowiek-maszyna¹⁵,
- wpływ bezwładności egzoszkieletu, szczególnie na szybkie ruchy użytkownika¹⁶.

Dobór i dopasowanie (uzbrajanie) egzoszkieletu

Prawidłowe użytkowanie egzoszkieletu początkowo uważane było za sztukę – do tego stopnia, że użytkowników egzoszkieletu nazywano pilotami. Jednak rozwój automatyki, robotyki oraz systemów sterowania, a także zmiana przeznaczenia z typowo militarnego (wykorzystanie przez wyselekcjonowanych zdrowych operatorów w skrajnych warunkach) na medyczny (wspomaganie i/lub zastępowanie podstawowych funkcji życiowych użytkowników z deficytami) wymusiło znaczące zmiany w tym zakresie. Z tych względów znacznemu uproszczeniu uległ również proces przygotowania użytkownika i jego szkolenia w wykorzystaniu egzoszkieletu. Jego przebieg pokazano na rysunku 8.



Rysunek 8. Ogólny przebieg przygotowania i szkolenia użytkownika, uzbrajania egzoszkieletu oraz prowadzenia terapii.

Źródło: E. Mikołajewska, D. Mikołajewski, *Exoskeletons in neurological diseases – current and potential future applications*, „Advances in Clinical and Experimental Medicine” 2011, Nr 2, s. 227–233

¹⁵ C. L. Lewis, D. P. Ferris, *Invariant hip moment pattern while walking with a robotic hip exoskeleton*, „J Biomech” 2011, Nr 5, s. 789–793; E. Mikołajewska, D. Mikołajewski, *The movement of a human being in the medical exoskeleton – the anthropomotoric aspects*, „Antropomotoryka” 2012, Nr 57, s. 115–121

¹⁶ G. Aguirre-Ollinger, J. E. Colgate, M. A. Peshkin i in., *A one-degree-of-freedom assistive exoskeleton with inertia compensation: the effects on the agility of leg swing motion*, „Proc Inst Mech Eng H” 2011, Nr 3, s. 228–245

Należy zauważyć, że na chwilę obecną brakuje metaanaliz, wytycznych klinicznych oraz rekomendacji w zakresie terapii z wykorzystaniem egzoszkieletu. W związku z powyższym trudno określić czas trwania początkowych etapów procesu przedstawionego na rysunku 8. Zakłada się, że od początkowych kilkudziesięciu dni będzie się, w miarę wzrostu wiedzy i doświadczenia personelu medycznego, schodzić stopniowo do kilku dni, tak by te etapy w pełni wpisywały się w obowiązujący w naszym kraju model rehabilitacji (również neurologicznej). Dodatkowo w zakresie dopuszczenia poszczególnych modeli egzoszkieletów do eksploatacji powinna wypowiedzieć się Agencja Oceny Technologii Medycznych (AOTM).

Ciekawą opcją, niedostępną na razie w wersjach medycznych, jest opcja przenoszenia/przetworzenia wstępnie zaprogramowanego egzoszkieletu w walizce (np. w bagażniku samochodu). W miejscu użytkowania egzoszkielet jest w krótkim czasie (< 30 minut) zakładany na pacjenta i uzbrajany, tj. przygotowywany do działania.

Wykorzystanie egzoszkieletu medycznego w trybie wsparcia

Tryb wsparcia obejmuje wykorzystanie egzoszkieletu jako wielofunkcyjnego narzędzia dla personelu medycznego na oddziałach szpitalnych i w domach opieki, a w sytuacjach szczególnie ciężkich stanów, wymagających bezpiecznego obracania, przenoszenia i obsługi ciężkich pacjentów (np. z zaburzeniami świadomości): również w opiece domowej. Szersze wykorzystanie egzoszkieletów w trybie wsparcia nie tylko zmniejszy obciążenie personelu, ale przyczyni się do wzrostu efektywności najbardziej męczących form terapii (np. reedukacji chodu) i opieki (np. kąpeli pacjenta), bezpieczeństwa pacjentów oraz spadku liczby urazów wśród personelu, wynikających z przeciążeń itp.

Wykorzystanie egzoszkieletu medycznego w trybie rehabilitacyjnym

Tryb rehabilitacyjny obejmuje wykorzystanie egzoszkieletu jako uniwersalnego narzędzia terapeutycznego – w wyniku połączenia funkcji stacjonarnego robota rehabilitacyjnego i elektrycznego wózka dla osób niepełnosprawnych oraz rozszerzenia ich o możliwość lokomocji dwunożnej, a w przypadku egzoszkieletów czterokończynowych: rozszerzenia również o wsparcie funkcji kończyn górnych. Tryb ten może być szczególnie przydatny dla jednostek niepełnosprawnych, jako rozwiązanie tymczasowe w trakcie powrotu do zdrowia oraz rosnącej liczby osób w podeszłym wieku, które na późnym etapie życia mogą wymagać analogicznych rozwiązań, w celu zapewnienia utrzymania dotychczasowej mobilności i samodzielności. Zalety wykorzystania egzoszkieletu w trybie rehabilitacyjnym są następujące:

- wykorzystanie całodzienne podczas normalnego cyklu aktywności użytkownika,
- wsparcie niemal wszystkich funkcji związanych z wykonywaniem czynności codziennego życia (obecnie ograniczenia występują w obszarze wsparcia palców rąk), zapewniające zwiększenie niezależności oraz jakości życia pacjenta, co przekłada się na odciążenie personelu medycznego oraz rodzin/opiekunów pacjentów,

- zapewnienie realizacji funkcji podparcia ciała, z uwzględnieniem zasad profilaktyki odleżynowej i innych niezbędnych procedur, zapobiegających niepożądanym zmianom wtórnym,
- zapewnienie dwuonożnej mobilności (co niesie ze sobą możliwość rezygnacji z budowy podjazdów, wind itp., a więc znaczne obniżenie kosztów), przy zapewnieniu możliwie naturalnych wzorców ruchów,
- adaptacja systemu sterowania oraz elastyczność systemu efektorów egzoszkieletu daje możliwość zarówno wspierania funkcji, jak i ich zastępowania (np. u pacjentów po amputacjach),
- częściowe (regulowane) odciążenie, zapewniające wspomagany powrót do pełnej sprawności funkcjonalnej pacjentom z osłabieniem siły mięśniowej oraz kontrolowane przez personel medyczny stopniowe nabycie siły i wytrzymałości, umożliwiającej zrezygnowanie ze wsparcia przez egzoszkielec.

Na obecną chwilę wskazania i przeciwwskazania do korzystania z egzoszkieletu medycznego nie zostały jednoznacznie sformułowane, gdyż rozwiązania komercyjne znajdują się ciągle w fazie badań klinicznych. Nie ulega jednak wątpliwości, że zasadnicze przeciwwskazania powinny stanowić: brak możliwości pełnej kontroli egzoszkieletu (w tym wyłącznika awaryjnego), zakłócenia pamięci, podatność na różnego rodzaju zaburzenia napadowe (epilepsja, tiki nerwowe), a także wrażliwość na wybrane leki. Wątpliwości budzi również bezpieczeństwo wykorzystania egzoszkielec przez dzieci – choć dotychczasowe doświadczenia, również krajowe, związane z rehabilitacją dzieci za pomocą robotów rehabilitacyjnych (w tym z użyciem toksyny botulinowej) zdają się potwierdzać taką możliwość¹⁷.

Zagrożenia oraz warunki bezpieczeństwa pacjenta i terapeuty (tryby awaryjne) zostały dość szczegółowo omówione¹⁸ na przykładzie całej grupy robotów rehabilitacyjnych. Uwagę zwraca konieczność wyposażenia egzoszkielec w wyłącznik awaryjny oraz system zapobiegający wyrwoceniu się egzoszkielec po awaryjnym zatrzymaniu.

Ograniczenia egzoszkielec, możliwe skutki uboczne stosowania (szczególnie długotrwałego) egzoszkielec, a także kwestie etyczne i prawne zostały dość szczegółowo omówione¹⁹. Dotyczą one szczególnie wymuszonej powtarzalności wzorców ruchu oraz braku implementacji w oprogramowanie egzoszkielec naturalnych odruchów, które przy długotrwałym wykorzystaniu użytkownik egzoszkielec może utracić, co jest szczególnie groźne w sytuacji tymczasowego wykorzystywania egzoszkielec (i konieczności późniejszego

¹⁷ E. Żak, J. Durmała, G. Sobota i in., *Trening z zastosowaniem zautomatyzowanej ortozy u dziecka z diplegią po użyciu toksyny botulinowej – studium przypadku*, „Acta Bio-Optica et Informatica Medica” 2010, Nr 3, s. 219–221; E. Żak, J. Durmała, S. Snela i in., *Wpływ rehabilitacji z wykorzystaniem dwóch zautomatyzowanych ortoz na przywracanie funkcji chodu*, „Acta Bio-Optica et Informatica Medica” 2010, Nr 4, s. 142–145

¹⁸ E. Mikołajewska, D. Mikołajewski, *Bezpieczeństwo pracy z robotami rehabilitacyjnymi*, „Bezpieczeństwo Pracy” 2012, Nr 2, s. 9–11

¹⁹ E. Mikołajewska, D. Mikołajewski, *The movement of a human being in the medical exoskeleton – the anthropomotoric aspects*, „Antropomotoryka” 2012, Nr 57, s. 115–121

powrotu do rzeczywistych, nie wspomaganych wzorców naturalnych) lub korzystania z niego przez dzieci. Wydaje się, że kwestie te będzie można rozwiązać na dalszych etapach rozwoju systemów sterowania, wykorzystywanych w egzoszkieleciech. Niezbędne staje się również opracowanie nowych narzędzi badawczych, obrazujących wpływ omawianych urządzeń na pacjentów, szczególnie w opiece długoterminowej.

Wspomagana egzoszkieletem terapia pacjentów z deficytami neurologicznymi

Wykorzystanie egzoszkieleatów w terapii pacjentów z deficytami neurologicznymi obejmuje przede wszystkim pięć zasadniczych obszarów:

- dość dobrze zbadane wykorzystanie egzoszkieleatów w reedukacji chodu (szczególnie u pacjentów po udarze i uszkodzeniu rdzenia kręgowego), uważane za efektywne podejście w nowoczesnej neurorehabilitacji²⁰,
- dość dobrze zbadane i uważane za efektywne (szczególnie w neurorehabilitacji po udarowej) wykorzystanie egzoszkieleatów w usprawnianiu kończyn górnych²¹, choć badania opierają się głównie na prototypach, gdyż egzoszkielety czterokończynowe są na razie rzadkością, a jedyny komercyjny egzoszkieleet czterokończynowy HAL5 nie wspiera funkcji dłoni, tylko ramienia i przedramienia,
- egzoszkielety dla pacjentów z hemiplegią (ze wspomaganie jednej strony) – na etapie badań, w tym nad wersją komercyjnego egzoszkieletu HAL5, przeznaczoną dla tej grupy pacjentów²²,
- egzoszkielety dla dzieci z deficytami neurologicznymi – trudniejsze w realizacji zarówno ze względów technicznych, jak i kwestii etycznych²³,
- egzoszkielety wyposażone w sterowanie za pomocą interfejsów mózg-komputer dla pacjentów z najcięższymi deficytami – opisane już przy projekcie *MindWalker*.

Wspomagana egzoszkieletem terapia pacjentów z amputacjami

Egzoszkielety wyposażone w jednoczesne sterowanie neuroprotezami ruchowymi stanowią istotny postęp w zakresie rehabilitacji pacjentów po amputacjach. Na dzień dzisiejszy

²⁰ J. Mehrholz, M. Pohl, *Electromechanical-assisted gait training after stroke: a systematic review comparing end-effector and exoskeleton devices*, „J Rehabil Med” 2012, Nr 3, s. 193–199; 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*, „Eur J Phys Rehabil Med” 2012, Nr 1, s. 111–121

²¹ H. S. Lo, S. Q. Xie, *Exoskeleton robots for upper-limb rehabilitation: state of the art and future prospects*, „Med Eng Phys” 2012, Nr 3, s. 261–268, A. H. Stienen, E. E. Hekman, H. ter Braak i in., *Design of a rotational hydroelastic actuator for a powered exoskeleton for upper limb rehabilitation*, „IEEE Trans Biomed Eng” 2010, Nr 3, s. 728–735, A. Frisoli, C. Procopio, C. Chisari i in., *Positive effects of robotic exoskeleton training of upper limb reaching movements after stroke*, „J Neuroeng Rehabil” 2012, Nr 9, s. 36

²² H. Kawamoto, T. Hayashi, T. Sakurai i in., *Development of single leg version of HAL for hemiplegia*, „Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc” 2009, s. 5038–5043

²³ T. Haumont, T. Rahman, W. Sample i in., *Wilmington robotic exoskeleton: a novel device to maintain arm improvement in muscular disease*, „J Pediatr Orthop” 2011, Nr 5, s. 44–49

sukces w obszarze zastępowania kończyn zanotowano w badaniach nad wspomaganie ruchów nadgarstka²⁴. Należy jednak pamiętać, że skonstruowanie (neuro)biologicznie realistycznych neuroprotez pięciopalczastych kończyn górnych oraz kończyn dolnych leży obecnie w obszarze badań wielu grup naukowców na całym świecie. Spodziewany w najbliższych kilku latach postęp techniczny w tym obszarze przełoży się również na rozwój egzoszkieletów dla pacjentów po amputacjach.

Wspomagane egzoszkieletem leczenie pacjentów osłabionych

Tymczasowe wykorzystanie egzoszkieletu podczas rekonwalescencji wydaje się rozwiązaniem idealnym w terapii pacjentów osłabionych wskutek choroby lub z mięśniami osłabionymi wskutek długotrwałego nieużywania. Możliwość zaprogramowania adaptacyjnego, selektywnego wspomaganie i dynamicznego odciążania pozwala na szczegółowe zaplanowanie i monitorowanie terapii, aż do całkowitego powrotu ograniczonych funkcji motorycznych. Dodatkowo wykorzystanie egzoszkieletu zmniejsza ryzyko upadków oraz pozwala wcześniej wrócić do pełnej aktywności (również: nauki i pracy), zarówno w ramach rehabilitacji szpitalnej, jak i domowej. Jednocześnie obniża się również ryzyko szkodliwych zmian wtórnych, związanych z brakiem ruchu i długotrwałym przebywaniem pacjenta w pozycji leżącej.

Wspomagane egzoszkieletem leczenie pacjentów geriatrycznych

Rehabilitacja i opieka domowa coraz większej populacji osób w podeszłym wieku (t. j. powyżej 65 r. ż.) wymaga rozwiązań podobnych do opisanych powyżej. Nie ulega wątpliwości, że nadal będzie rosła presja na podwyższenie jakości życia pacjentów w tej grupie wiekowej. Egzoszkielety mogą stanowić rozwiązanie uzupełniające w terapii wielu schorzeń niosących ze sobą ryzyko upadków, niskiej wydolności ogólnej, łamliwości kości itp., zarówno podczas rekonwalescencji, jak i na stałe.

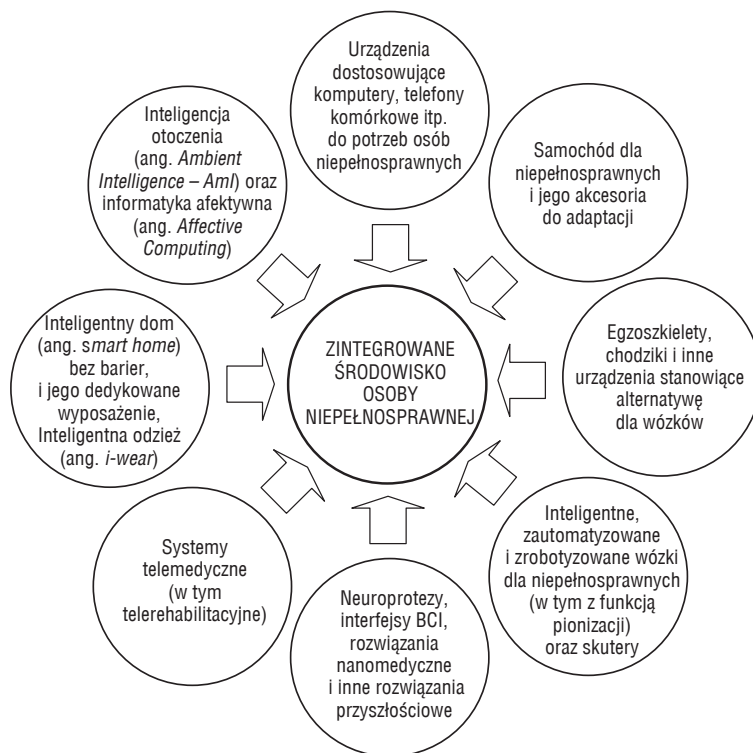
Egzoszkielet w środowiskach zintegrowanych

Rozwój Społeczeństwa Informacyjnego, w którym informacja i umiejętność jej wykorzystania ma wyższą wartość niż fizyczne umiejętności wykonania pracy, a także rozwój systemów teleinformatycznych, związanych z pozyskiwaniem, przetwarzaniem, analizą i prezentacją informacji, każe nam spojrzeć na egzoszkielety jako na jeszcze jeden element tego systemu. Już dziś wykorzystanie rozwiązań zintegrowanych, takich jak inteligentny dom (ang. *smart home*) czy inteligentne ubranie (ang. *i-wear*) przekłada się na wzrost samodzielności i jakości życia osób niepełnosprawnych, przewlekle chorych i w podeszłym wieku²⁵. Dalszy przewidy-

²⁴ Z. O. Khokhar, Z. G. Xiao, C. Menon, *Surface EMG pattern recognition for real-time control of a wrist exoskeleton*, „Biomed Eng Online” 2010, Nr 9, s. 41

²⁵ E. Mikołajewska, D. Mikołajewski, *Neurorehabilitacja XXI wieku: Techniki teleinformatyczne*, Kraków, Impuls, 2011

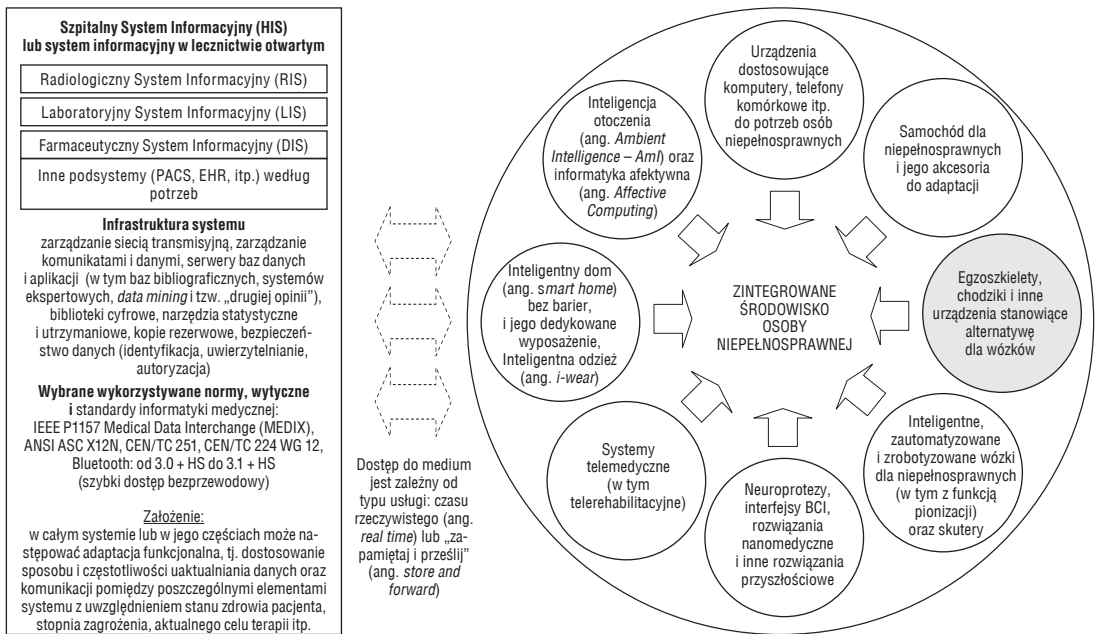
wany rozwój technologiczny w kierunku Internetu Rzeczy (ang. *Internet of Things* – IoT), inteligencji otoczenia (ang. *Ambient Intelligence* – Aml) oraz informatyki afektywnej (ang. *Affective Computing* – AC) pociągną za sobą dalszą integrację poszczególnych rozwiązań dedykowanych tej grupie odbiorców. Przykładem tego kierunku badań jest rozwój zintegrowanego środowiska osoby niepełnosprawnej (rysunek 9; na rysunku nie pokazano podsystemów: sterowania oraz transmisji informacji). Ułatwia ono stworzenie elastycznego, otwartego na rozbudowę środowiska przyjaznego pacjentowi i zwiększającego jego możliwości.



Rysunek 10. Zintegrowane środowisko osoby niepełnosprawnej (rozwiązanie własne). Źródło: E. Mikołajewska, D. Mikołajewski, *Exoskeletons in neurological diseases – current and potential future applications*, „Advances in Clinical and Experimental Medicine” 2011, Nr 2, s. 227–233; E. Mikołajewska, D. Mikołajewski, *Neuroprostheses for increasing disabled patients’ mobility and control*, „Advances in Clinical and Experimental Medicine” 2012, Nr 2, s. 263–272; 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, *Wheelchairs development from the perspective of physical therapists and biomedical engineers*, „Advances in Clinical and Experimental Medicine” 2010, Nr 6, s. 771–776

Odrębnie rozpatrywanym elementem jest współdziałanie wspomnianych systemów zintegrowanych z obecnie funkcjonującymi i przyszłościowymi systemami informacyjnymi w ochronie zdrowia. Chodzi tu przede wszystkim o szpitalne systemy informacyjne (ang. *Hospital Information System* – HIS), systemy informacyjne w lecznictwie otwartym oraz ich podsystemy dziedziczne

i funkcjonalne. Jest to pożądane w celu zapewnienia ciągłości i bezpieczeństwa wymiany informacji oraz efektywnego monitorowania stanu zdrowia pacjenta. Pomimo znacznych nakładów niezbędnych do uruchomienia systemu wydaje się, że w dłuższym horyzoncie czasowym może się to przełożyć na efektywniejsze wykorzystanie posiadanych zasobów oraz szybsze reagowanie na zmiany w stanie zdrowia pacjenta, co w efekcie może dać znaczne oszczędności. Próbę ujęcia systemowego w tym zakresie przedstawiono na rysunku 11.



Rysunek 11. Miejsce zintegrowanego środowiska teleinformatycznego osoby niepełnosprawnej wśród systemów zaliczanych do informatyki medycznej.

Źródło: E. Mikołajewska, D. Mikołajewski, *Egzoszkielety we współczesnych środowiskach zintegrowanych*, „Zeszyty Naukowe WSOOWL” 2011, Nr 4, s. 246–253

Kierunki rozwoju egzoszkieleatów medycznych

Badania nad medycznym wykorzystaniem egzoszkieleatów koncentrowały się początkowo głównie na aspektach biomechanicznych współdziałania układu człowiek-egzoszkieleć, jak również na problemach kontroli nerwowej i kosztu energetycznego ruchu człowieka w egzoszkielecie, uzupełniając dotychczasową wiedzę z zakresu neurologii, neurofizjologii i rehabilitacji, w tym z wykorzystaniem robotów rehabilitacyjnych. Należy przy tym pamiętać, że badania podstawowe nad rozwojem egzoszkieleatów często dotyczyły ich wykorzystania militarnego, a więc zakładały ich użycie przez zdrowych i w pełni sprawnych użytkowników. Wykorzystanie wyników dotychczasowych badań w egzoszkieleatach medycznych wymagało zatem pewnej adaptacji. Niemniej jednak te badania pozwalały na wstępne wypracowanie procedur doboru

egzoszkieletu do stanu zdrowia, możliwości i potrzeb użytkownika, dostrojenia jego parametrów (w tym wzorców ruchu) do konkretnego pacjenta oraz przeprowadzenie podstawowego szkolenia użytkownika i jego rodziny/opiekunów. Obecnie, wobec pojawienia się nowych możliwości technicznych, badania naukowe przenoszą swój punkt ciężkości w kierunku:

1. w obszarze medycznym:

- oparcia medycznego wykorzystania różnych modeli i wersji egzoszkieletów na badaniach klinicznych prowadzonych na dużych grupach pacjentów z różnymi schorzeniami, zgodnie z paradygmatem Medycyny Opartej na Faktach (ang. *Evidence Based Medicine* – EBM),
- zbadania efektywności ww. form terapii, zarówno w przypadku wykorzystywania egzoszkieletu jako wiodącej metody rehabilitacyjnej (np. w rehabilitacji długoterminowej domowej), jak i uzupełniającej metody rehabilitacyjnej (np. w rehabilitacji na szpitalnym oddziale rehabilitacji neurologicznej jako jednej z form reedukacji chodu),
- sformułowania czytelnych procedur kwalifikacji pacjenta do terapeutycznego wykorzystania egzoszkieletu, z uwzględnieniem wskazań i przeciwwskazań,
- stworzenia modelu rehabilitacji z wykorzystaniem egzoszkieletu, w różnych schorzeniach oraz stanach funkcjonalnych pacjenta,
- włączenia wykorzystania egzoszkieletu do rehabilitacji, np. w ramach telerehabilitacji kardiologicznej, która dość dobrze rozwija się w naszym kraju²⁶;

2. w obszarze technicznym:

- zwiększenia energooszczędności i wydłużenia czasu między kolejnymi ładowaniami akumulatorów,
- miniaturyzacji poszczególnych elementów i wykorzystania nowych materiałów, a co za tym idzie: zmniejszenia wagi gotowego egzoszkieletu,
- doskonalenie systemu sterowania oraz wprowadzenie możliwości sterowania egzoszkieletem za pomocą interfejsu mózg-komputer (egzoszkielet jako inteligentna neuroproteza na całe ciało) – prace są prowadzone m. in. w ramach projektu *MindWalker*²⁷, kończącego się w połowie 2013 r., którego wstępne wyniki, w postaci działającego prototypu, zaprezentowano w październiku 2012 r.,

²⁶ I. Korzeniowska-Kubacka, B. Dobraszkiewicz-Wasilewska, M. Bilińska i in., *Two models of early cardiac rehabilitation in male patients after myocardial infarction with preserved left ventricular function: comparison of standard out-patient versus hybrid training programmes*, „Kardiologia Polska” 2011, Nr 3, s. 220–226; E. Mikołajewska, D. Mikołajewski, *Telerehabilitacja kardiologiczna*, „Ogólnopolski Przegląd Medyczny” 2012, Nr 6, s. 29–32; E. Mikołajewska, D. Mikołajewski, *Neurological telerehabilitation – current and potential future applications*, „Journal of Health Sciences” 2011, Nr 4, s. 7–14; E. Mikołajewska, D. Mikołajewski, *Telerehabilitacja*, „Rehabilitacja w Praktyce” 2011, Nr 1, s. 64–67

²⁷ Strona internetowa projektu *MindWalker*: <https://mindwalker-project.eu>, [data pobrania: 01.12.2012]; M. Duvinage, T. Castermans, R. Jimenez-Fabian i in., *A five-state P300-based foot lifter orthosis: Proof of concept*, „Proceedings of the 3rd IEEE Biosignals and Biorobotics conference (ISSNIP)”, Manaus, Brazylia, 2012, s. 1–6

- haptyczne (dotykowe) sprzężenie zwrotne jako element rehabilitacji,
 - koncepcja sztucznej pięciopalczastej neuroprotezy kończyny górnej,
 - wersji pediatricznych, gdzie dochodzi dodatkowy problem regulacji lub wymiany elementów egzoszkieletu (a, co za tym idzie – niekiedy ponownej regulacji i aktualizacji oprogramowania) w miarę wzrostu małego użytkownika;
3. w obszarze organizacyjnym:
- zwiększenia liczby badań interdyscyplinarnych (na styku medycyna-inżynieria biomedyczna) nad klinicznym wykorzystaniem egzoszkieleatów i robotów rehabilitacyjnych, zarówno w obszarze badań podstawowych, jak i stosowanych,
 - przygotowania personelu medycznego do wykorzystania zaawansowanych rozwiązań technicznych, co pociąga za sobą modyfikację programów nauczania oraz zmiany w kształceniu podyplomowym,
 - przygotowania personelu inżynierskiego do współpracy z wielodyscyplinarnym zespołem terapeutycznym.

Warto również zwrócić uwagę, że krajowe badania nad robotami rehabilitacyjnymi są prowadzone w Przemysłowym Instytucie Automatyk i Pomiarów (PIAP) w Warszawie (modele Renus-1 i Renus-2), natomiast badania nad polskim egzoszkieletem są prowadzone na Politechnice Śląskiej w ramach projektu „Rehabilitacyjny egzoszkielek kończyn dolnych”.

Wnioski

Szersze kliniczne wykorzystanie egzoszkieleatów, jak każde nowatorskie rozwiązanie, wiąże się zarówno z szeregiem niezbędnych zmian organizacyjnych, jak i z przełamaniem oporów personelu medycznego, a także samych pacjentów i ich rodzin, przed korzystaniem z robota. Wyższa efektywność terapii, samodzielność i jakość życia pacjentów mogą być tu argumentami nie do odrzucenia. Warto już dziś dołożyć starań, aby ta okazja nam nie umknęła – część krajów (USA, Japonia, Izrael, a w Europie kraje skandynawskie) już prowadzi badania kliniczne. W naszej polskiej rzeczywistości stacjonarne roboty rehabilitacyjne już przestały być czymś niezwykłym. Być może warto zintensyfikować wysiłki, by dołączyły do nich egzoszkieleaty, które mogłyby zastąpić wózki inwalidzkie, nadając nowe brzmienie słowom „osoba niepełnosprawna”.

Literatura

- Belda-Lois J. M., Mena-del Horno S., Bermejo-Bosch I. i in., *Rehabilitation of gait after stroke: a review towards a top-down approach*, „J Neuroeng Rehabil” 2011, Nr 8
- Cavallaro E. E., Rosen J., Perry J. C. i in., *Real-time myoprocessors for a neural controlled powered exoskeleton arm*, „IEEE Trans Biomed Eng” 2006, Nr 11
- Converging clinical and engineering research on neurorehabilitation*, red. Pons J. L., Torricelli D., Pajaro M., Heidelberg-New York, Springer, 2013
- Duvinage M., Castermans T., Jimenez-Fabian R. i in., *A five-state P300-based foot lifter orthosis: Proof of concept*, Proceedings of the 3rd IEEE Biosignals and Biorobotics conference (ISSNIP), Manaus, Brazylia, 2012

- Frisoli A., Procopio C., Chisari C. i in., *Positive effects of robotic exoskeleton training of upper limb reaching movements after stroke*, „J Neuroeng Rehabil” 2012, Nr 9
- Haumont T., Rahman T., Sample W. i in., *Wilmington robotic exoskeleton: a novel device to maintain arm improvement in muscular disease*, „J Pediatr Orthop” 2011, Nr 5
- 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*, „Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc” 2009
- Khokhar Z. O., Xiao Z.G., Menon C., *Surface EMG pattern recognition for real-time control of a wrist exoskeleton*, „Biomed Eng Online” 2010, Nr 9
- Korzeniowska-Kubacka I., Dobraszkiewicz-Wasilewska B., Bilińska M. i in., *Two models of early cardiac rehabilitation in male patients after myocardial infarction with preserved left ventricular function: comparison of standard out-patient versus hybrid training programmes*, „Kardiologia” 2011, Nr 3
- Lo H. S., Xie S. Q., *Exoskeleton robots for upper-limb rehabilitation: state of the art and future prospects*, „Med Eng Phys” 2012, Nr 3
- Mehrholz J., Pohl M., *Electromechanical-assisted gait training after stroke: a systematic review comparing end-effector and exoskeleton devices*, „J Rehabil Med” 2012, Nr 3
- Mikołajewska E., *Eclectic approach as the natural way of development in neurological rehabilitation of adults*, „International Journal on Disability and Human Development”, doi 10.1515/ijdh-2012-0103
- Mikołajewska E., *Obiektywizacja wyników rehabilitacji – próba ujęcia kompleksowego*, „Nowiny Lekarskie” 2011, Nr 4
- Mikołajewska E., *Znaczenie podejścia eklektycznego we współczesnej fizjoterapii*, „Praktyczna Fizjoterapia i Rehabilitacja” 2012, Nr 33
- Mikołajewska E., Mikołajewski D., *Bezpieczeństwo pracy z robotami rehabilitacyjnymi*, „Bezpieczeństwo Pracy” 2012, Nr 2
- Mikołajewska E., Mikołajewski D., *Egzoskielety we współczesnych środowiskach zintegrowanych*, „Zeszyty Naukowe WSOWL” 2011, Nr 4
- 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., *Exoskeletons in neurological diseases – current and potential future applications*, „Advances in Clinical and Experimental Medicine” 2011, Nr 2
- Mikołajewska E., Mikołajewski D., *Neurological telerehabilitation – current and potential future applications*, „Journal of Health Sciences” 2011, Nr 4
- Mikołajewska E., Mikołajewski D., *Neuroprostheses for increasing disabled patients’ mobility and control*, „Advances in Clinical and Experimental Medicine” 2012, Nr 2
- Mikołajewska E., Mikołajewski D., *Neurorehabilitacja XXI wieku: Techniki teleinformatyczne*, Kraków, Impuls, 2011
- Mikołajewska E., Mikołajewski D., *ReoAmbulator jako nowoczesne narzędzie w reedukacji chodu*, „Praktyczna Fizjoterapia i Rehabilitacja” 2012, Nr 9
- Mikołajewska E., Mikołajewski D., *Telerehabilitacja*, „Rehabilitacja w Praktyce” 2011, Nr 1
- Mikołajewska E., Mikołajewski D., *Telerehabilitacja kardiologiczna*, „Ogólnopolski Przegląd Medyczny” 2012, Nr 6
- Mikołajewska E., Mikołajewski D., *The movement of a human being in the medical exoskeleton – the anthropomotoric aspects*, „Antropomotoryka” 2012, Nr 57
- Mikołajewska E., Mikołajewski D., *Wheelchairs development from the perspective of physical therapists and biomedical engineers*, „Advances in Clinical and Experimental Medicine” 2010, Nr 6
- Pons J. L., *Wearable robots: biomechatronic exoskeletons*, Hoboken, John Wiley & Sons, 2008
- Rocon E., Pons J. L., *Exoskeletons in rehabilitation robotics*, Heidelberg-New York, Springer, 2011
- 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*, „Eur J Phys Rehabil Med” 2012, Nr 1

- Stienenw A. H., Hekman E. E., ter Braak H. i in., *Design of a rotational hydroelastic actuator for a powered exoskeleton for upper limb rehabilitation*, „IEEE Trans Biomed Eng” 2010, Nr 3
- Zeilig G., Weingarden H., Zwecker M., *Safety and tolerance of the ReWalk exoskeleton suit for ambulation by people with complete spinal cord injury: A pilot study*, „J Spinal Cord Med” 2012, Nr 2
- Żak E., Durmała J., Sobota G. i in., *Trening z zastosowaniem zautomatyzowanej ortozy u dziecka z diplegią po użyciu toksyny botulinowej – studium przypadku*, „Acta Bio-Optica et Informatica Medica” 2010, Nr 3
- Żak E., Durmała J., Snela S. i in., *Wpływ rehabilitacji z wykorzystaniem dwóch zautomatyzowanych ortoz na przywracanie funkcji chodu*, „Acta Bio-Optica et Informatica Medica” 2010, Nr 4

Netografia

- Strona internetowa projektu *MindWalker*: <https://mindwalker-project.eu>, [data pobrania: 01.12.2012]
- Egzoszkielec HAL5 – Strona internetowa firmy Cyberdyne Inc. <http://www.cyberdyne.jp/english/>, [data pobrania: 01.12.2012]
- Egzoszkielec ReWalk – Strona internetowa firmy Argo Medical Technologies <http://rewalk.com>, [data pobrania: 01.12.2012]
- Egzoszkielec Ekso – Strona internetowa firmy Ekso Bionics: <http://www.eksobionics.com>, [data pobrania 01.12.2012]