

PRACA POGLĄDOWA

## Nowoczesne rozwiązania techniczne w usprawnianiu funkcji kończyn górnych

Modern technical solutions in improving function of upper  
extremities

Emilia Mikołajewska<sup>1</sup>, Dariusz Mikołajewski<sup>2</sup>

STRESZCZENIE

<sup>1</sup>Klinika Rehabilitacji  
10 Wojskowy Szpital Kliniczny  
z Polikliniką SP ZOZ  
w Bydgoszczy,  
<sup>2</sup>Katedra Informatyki Stosowanej  
Wydziału Fizyki, Astronomii  
i Informatyki Stosowanej  
Uniwersytetu Mikołaja Kopernika  
w Toruniu

Schorzenia, urazy oraz inne zmiany patologiczne mogą ograniczać realizację funkcji kończyn górnych. Naukowcy i klinicyści ciągle poszukują nowych, efektywniejszych rozwiązań do wykorzystania ich w terapii. Artykuł stanowi przegląd podstawowych rozwiązań robotów rehabilitacyjnych i egzoszkieleatów wykorzystywanych w rehabilitacji funkcji kończyn górnych. Autorzy podejmują dyskusję na temat zastosowania wymienionych rozwiązań w warunkach klinicznych do przywracania funkcji kończyn górnych.

SŁOWA KLUCZOWE

rehabilitacja ręki, fizjoterapia ręki, rehabilitacja kończyny górnej, fizjoterapia kończyny górnej, roboty rehabilitacyjne, egzoszkieleaty

ABSTRACT

**ADRES  
DO KORESPONDENCJI:**  
Dr n. med. Emilia Mikołajewska  
Klinika Rehabilitacji  
10 Wojskowy Szpital Kliniczny  
z Polikliniką SP ZOZ  
ul. Powstańców Warszawy 5  
85-681 Bydgoszcz  
tel. +48 72 588 99 09  
e-mail: e.mikolajewska@wp.pl

Diseases, injuries and other pathologies can limit upper limb functions. Scientists and clinicians are constantly looking for new, more effective solutions to use in therapy of upper limb functions. This article reviews the basic rehabilitative robots and exoskeletons in the rehabilitation of upper limb functions and then considers how the principles may be applied in clinical conditions to restore the functions of upper limbs.

KEY WORDS

arm rehabilitation, arm physical therapy, upper limb rehabilitation, upper limb physical therapy, rehabilitative robots, exoskeletons

Ann. Acad. Med. Siles. 2012, 66, 4, 34–40  
Copyright © Śląski Uniwersytet Medyczny  
w Katowicach

## WPROWADZENIE

Funkcje kończyn górnych są dla człowieka funkcjami podstawowymi, a ich brak lub ograniczenie (stałe lub czasowe) jest postrzegany jako jedna z najbardziej dokuczliwych konsekwencji wielu zmian patologicznych. Stopień realizacji funkcji kończyny górnej wpływa znacząco na subiektywną (oceniającą przez pacjenta) i obiektywną (mierzoną w ramach diagnostyki) jakość życia, gdyż upośledzenie, nawet w zakresie jednej kończyny górnej, przekłada się negatywnie przede wszystkim na:

- możliwość nauki i pracy (pisanie odręcznego, korzystania z komputera, kierowania pojazdami),
- wykonywanie czynności życia codziennego (higiena osobista itp.),
- kontakt z najbliższym otoczeniem (dotyk, chwytanie, zdolności manipulacyjne, czucie kształtu, tekstury, temperatury),
- uczestnictwo w życiu społecznym (podawanie ręki itp.).

Do usprawniania funkcji kończyn górnych przykładą się bardzo dużą wagę, mimo to – ze względu na złożoność tych funkcji oraz różne stopnie i rodzaje ograniczeń – proces leczenia i rehabilitacji może być bardzo złożony i długotrwały, nie gwarantując jednocześnie pełnego powrotu do sprawności. Efektywny proces usprawniania wymaga również dokładnego planowania kolejności i rodzaju zabiegów, od interwencji chirurgicznych poprzez farmakoterapię aż po fizjoterapię. Niezbędna do tego podstawowa analiza funkcji kończyn górnych obejmuje zwykle wybór spośród takich narzędzi diagnostycznych, jak:

- badanie czucia,
- badania ergometryczne,
- pomiary goniometryczne,
- pomiary liniowe,
- testy funkcjonalne ręki,
- kwestionariusze do badań przedmiotowych,
- wykorzystanie systemu VICON do diagnostyki kończyn górnych,
- wykorzystanie elektronicznych urządzeń do diagnostyki zakresu ruchu, siły ścisku itp. [1,2,3].

Właściwie wykorzystana analiza pozwala na dobór odpowiednich metod terapii kończyn górnych, śledzenie zmian sprawności funkcjonalnej pacjenta, ocenę efektywności terapii na poszczególnych jej etapach oraz wprowadza-

nie korekt w zaplanowanych interwencjach terapeutycznych [4].

Obecnie dominuje pogląd, że nie ma jednej uniwersalnej metody analizy funkcji kończyn górnych. Metody uważane za obiektywne (pomiary zakresu ruchu, siły ścisku itp.) nie zawsze oddają istotę poprawy, choć mogą uchwycić już drobne zmiany niedostrzeżone przez pacjenta, a metody subiektywne nie zawsze są miarodajne i w części przypadków z trudem nadają się do porównań. Dodatkowo na wynik badania ma wpływ doświadczenie osoby wykonującej analizę funkcjonalną, a także wiele innych czynników, takich jak uwzględnienie ręki dominującej, ból i obrzęk, zrosty i bliznowacenie czy możliwe deformacje. Odrębną kwestię w omawianym zakresie stanowi aparatowanie kończyn górnych, które ze względu na potrzeby zachowania zdolności manipulacyjnych przez pacjenta wymaga odmiennego podejścia niż w przypadku kończyn dolnych [5]. Z pomocą mogą tu przyjść wkrótce nowoczesne neuroprotezy kończyn górnych.

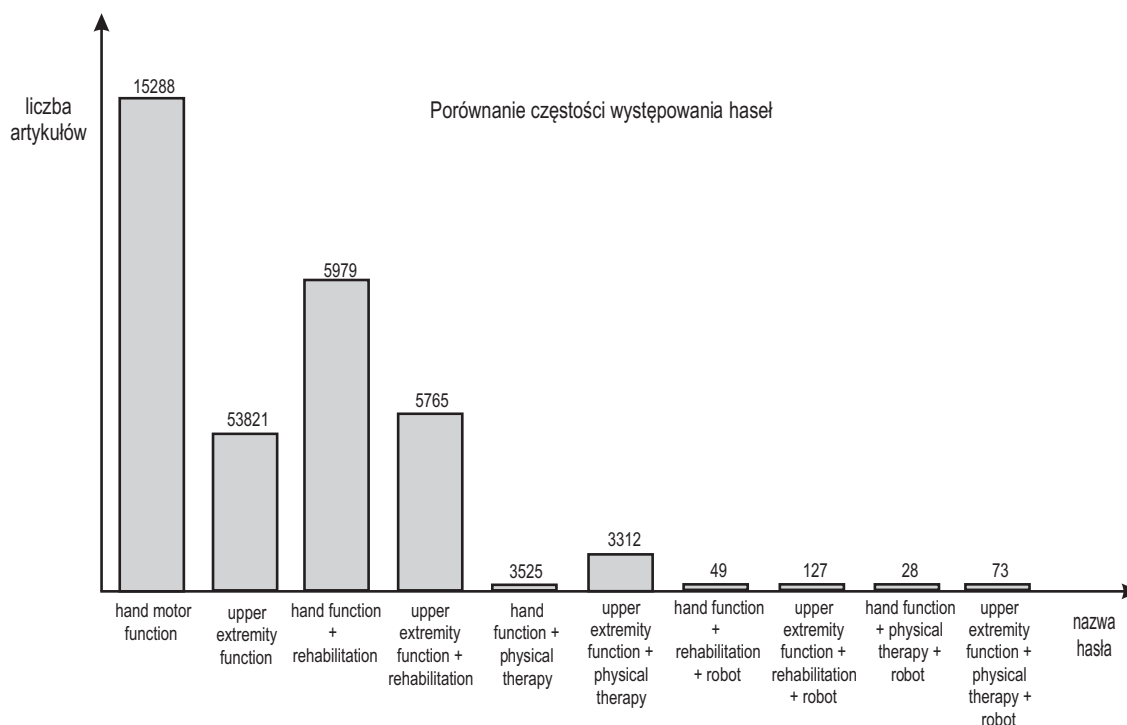
## AUTOMATYZACJA I ROBOTYZACJA USPRAWNIANIA FUNKCJI KOŃCZYN GÓRNYCH

Dokonano przeglądu publikacji indeksowanych w bazie *PubMed* [6] dotyczących usprawniania funkcji kończyn górnych (ryc. 1). Pomimo dużej liczby publikacji na temat rehabilitacji funkcji kończyny górnej, zwraca uwagę bardzo mała liczba pozycji dotyczących wykorzystania do tego celu robotów rehabilitacyjnych. Uwzględniając, że robotyka rehabilitacyjna dynamicznie rozwija się przez ostatnie 20 lat [7,8,9,10] i może stanowić przełom w rehabilitacji funkcji kończyn górnych, to publikacje w tym zakresie wciąż stanowią jedynie 0,8–2,2% (zależnie od doboru słów kluczowych) wszystkich publikacji poświęconych rehabilitacji funkcji kończyn górnych.

Naukowcy i klinicyści ciągle poszukują nowych, efektywniejszych rozwiązań do wykorzystania w usprawnianiu funkcji kończyn górnych. Do najnowocześniejszych osiągnięć w tym zakresie należą roboty rehabilitacyjne i egzoszkielety czterokończynowe, tj. wspomagające jednocześnie kończyny dolne i górne.

## 1. ROBOTY REHABILITACYJNE

Baza danych MeRoDa (Medical Robotics Database) podaje 46 projektów związanych z robotyką rehabilitacyjną. Wykaz projektów związanych z rehabilitacją funkcji kończyn górnych został przedstawiony w tabeli I.



Ryc. 1. Wyniki wyszukiwania w bazie PubMed (U.S. National Library of Medicine) w zakresie rehabilitacji funkcji kończyn górnych [6].

Fig. 1. Results of investigation of PubMed database (U.S. National Library of Medicine) in area of rehabilitation of upper limb function [6].

Tabela I. Projekty badawcze dotyczące robotów rehabilitacyjnych przeznaczonych do usprawniania funkcji kończyn górnych (kolejność alfabetyczna) [11]

Table I. Research projects in area of rehabilitation robots used in rehabilitation of upper limb function (alphabetical order) [11]

Nazwa	Wykonawca projektu i rok	Przeznaczenie
ARM GUIDE	Department of Biomedical Engineering, University of California, Irvine, USA, od 2002	przywracanie funkcji kończyny górnej po udarze
ARMIN	Institut für Automatik, ETH Zürich, Szwajcaria, od 2001	rehabilitacja kończyny górnej
Bi-Manu-Track	Reha-Stim, Niemcy, 1996	rehabilitacja dłoni i przedramienia
CADEN7	Department of Mechanical Engineering, University of Washington, USA, od 2006	neurorehabilitacja kończyny górnej
CH02	Sensory-Motor Systems Lab., Szwajcaria, od 1985	ruch jednej ręki pacjenta, również na potrzeby obrazowania MRI
FRA09	Laboratoire Ampere UMR CSRS, Francja, od 2009	rehabilitacja funkcji kończyny górnej, uważany niekiedy za element egzoszkieletu
HANDEXOS	ARTS Lab Scuola Superiore Sant'Anna, Włochy	rehabilitacja poudarowa pojedynczych palców dłoni
ITALIA10	Behavioral Imaging and Neural Dynamics Center, University „G. d'Annunzio”, Włochy, od 2009	rehabilitacja kończyny górnej po udarze niedokrwiennym mózgu wykorzystująca rzeczywistość wirtualną
KINARM	BKIN technologies Ltd., Kanada, 2004	rehabilitacja ramienia, łokcia i dłoni po udarze
L-EXOS	PERCRO, Scuola Superiore Sant'Anna, Włochy, od 2007	rehabilitacja lewej kończyny górnej
MARIBOT	The Mechatronics Group, DIMEG, Włochy	rehabilitacja kończyny górnej
MIME	MAHI Lab, Rice University, USA, 2002	rehabilitacja poudarowa kończyny górnej
MIT-MANUS	Mechanical Engineering Department, Newman Laboratory for Biomechanics and Human Rehabilitation, Massachusetts Institute of Technology, USA, od 1997	neurorehabilitacja kończyny górnej

Nazwa	Wykonawca projektu i rok	Przeznaczenie
MR_CHIROD	Department of Mechanical and Industrial Engineering, Northeastern University, USA, od 2006	rehabilitacja funkcji chwytu dłonią
NEREBOT	The Mechatronics Group, DIMEG, Włochy, od 2001	jak MARIBOT
REACHMAN	Department of Bioengineering, Imperial College Londyn, Wlk. Brytania, 2009	rehabilitacja funkcji dłoni i nadgarstka, funkcji chwytu dłonią
REHABEXOS	PERCRO, Scuola Superiore Sant'Anna, Włochy, od 2009	jak L-EXOS i CADEN7
REHAROB	Budapest University of Technology and Economics, Department of Manufacturing Engineering, Węgry, od 2003	rehabilitacja kończyny górnej osób niepełnosprawnych
RENUS-1	Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów (PIAP), Polska, od 2006	rehabilitacja funkcji przedramienia
RiceWrist	MAHI Lab, Rice University, USA, od 2007	rehabilitacja funkcji dłoni
SUEFUL-7	Saga University, Honjomachi, Japan, od 2009	rehabilitacja funkcji przedramienia, uważany niekiedy za element egzoszkieletu
USA44	Department of Electrical Engineering and Computer Science, University of California w Berkeley, USA, 1993	rehabilitacja obu kończyn górnych, w tym funkcji chwytania, ściskania i dosięgania
USA47	Department of Mechanical Engineering, Vanderbilt University, USA, od 2009	rehabilitacja kończyny górnej

Wykorzystanie robotów rehabilitacyjnych w usprawnianiu kończyn górnych może przynieść następujące korzyści:

- podniesienie precyzji ruchów podczas ćwiczeń, ich powtarzalności oraz, w wybranych przypadkach, umożliwienie zaprogramowania złożonych sekwencji ruchów
- powiązanie kierunku i stopnia zmian w parametrach ruchu w zależności od wyników odnotowanych podczas sesji terapeutycznej,
- podniesienie efektywności terapii,
- skrócenie czasu terapii.

Należy mieć przy tym na uwadze, że wykorzystanie robotów rehabilitacyjnych z reguły nie jest samodzielną metodą rehabilitacyjną, a jedynie uzupełniającą formą terapii, również w połączeniu z farmakoterapią i innymi od-

działywaniami. Efektywność terapii jako całości jest zatem synergią wszystkich oddziaływań. Trudno zatem ocenić efektywność samego robota rehabilitacyjnego, a z drugiej strony jego oddziaływanie musi nie tylko uzupełniać, ale i wspierać efektywność oddziaływania innymi metodami.

## 2. CZTEROKOŃCZYNOWE EGZOSZKIELETY MEDYCZNE

Czterokończynowe egzoszkielety medyczne są rzadkością, dodatkowo problem w zakresie funkcji ręki dotyczy usprawniania, wspomaganie lub zastępowania funkcji palców dłoni. Być może próby w zakresie funkcji palców zostaną uwieńczone sukcesem w miarę postępów nad konstruowaniem sztucznych dłoni sterowanych impulsami nerwowymi (neuroprotezy dłoni) [10,12,13,14,15].

**Tabela II.** Egzoszkielety czterokończynowe, w tym medyczne, związane z rehabilitacją funkcji kończyn górnych (kolejność alfabetyczna) [11]

**Table II.** Four limb exoskeletons (including medical exoskeletons) used in rehabilitation of upper limb function (alphabetical order) [11]

Nazwa	Wykonawca i rok	Przeznaczenie
Czterokończynowe egzoszkielety medyczne:		
HAL 5	Graduate School of Systems and information Engineering, University of Tsukuba, Japonia, od 2005	rehabilitacja kończyn górnych, bez dłoni
Inne egzoszkielety czterokończynowe – do ewentualnego wykorzystania w zastosowaniach medycznych:		
XOS	Sarcos i Raytheon, USA, od 2000	egzoszkielet wojskowy
HULC	Lockheed Martin i Berkeley Bionics, od 2000	egzoszkielet wojskowy

**Tabela III.** Porównanie możliwości robotów rehabilitacyjnych i egzoszkieleatów wykorzystywanych w rehabilitacji funkcji kończyny górnej (na podst. [16])**Table III.** Comparison of possibilities of rehabilitation robots and exoskeletons used in rehabilitation of upper limb function (based on [16])

Funkcjonalność	Roboty rehabilitacyjne	Egzoszkieleaty
Wyposażenie indywidualne	nie, ewentualnie w telerehabilitacji	tak
Sprzęt terapeutyczny	tak	tak, ale brak egzoszkieleatów wspomagających pojedyncze (lub oddzielnie) palce dłoni
Sprzęt do pomocy w czynnościach życia codziennego	nie	tak
Zastępowanie utraconych funkcji	nie	tak
Jednoczesna poprawa mobilności	nie	tak
Wersja pediatryczna	tak	w opracowaniu

**KIERUNKI ROZWOJU**

Badania nad robotami rehabilitacyjnymi do usprawniania funkcji kończyn górnych podejmowane są również w naszym kraju, także w zakresie sterowanych komputerem urządzeń do jednoczesnej rehabilitacji sprawności ruchowej niedowładnej ręki, koordynacji wzrokowo-ruchowej i innych procesów poznawczych [17]. Rozwój ten będzie, być może, stymulowany dzięki powstającym placówkom służby zdrowia wyspecjalizowanym w rehabilitacji funkcji kończyny górnej (m.in. Małopolskie Centrum Rehabilitacji Ręki).

Przedstawione możliwości usprawniania funkcji kończyn górnych z wykorzystaniem robotów rehabilitacyjnych i egzoszkieleatów mogą być znacznie rozszerzone dzięki:

- wykorzystaniu biologicznego sprzężenia zwrotnego (*biofeedback*), rzeczywistości wirtualnej (*virtual reality* – VR) czy rzeczywistości rozszerzonej (*augmented reality* – AR),
- integracji omawianych rozwiązań w większe środowiska w ramach rozwoju tzw. technologii wspomagającej (*assistive technology* – AT), w tym dedykowane osobom niepełnosprawnym w ramach inteligentnego domu (*smart home*) [18], inteligentnego otoczenia (*Ambient Intelligence* – AmI) czy zintegrowanego środowiska osoby niepełnosprawnej [19,20].

Duży ukryty potencjał do zastosowań w usprawnianiu funkcji kończyny górnej, szczególnie u dzieci, mogą mieć również:

- rozwiązania typu Apple Magic Mouse, manipulatory do gier, takie jak Kinetic, Kinect, Move, EyeToy itp.,
- uprząże i kombinezony do gier komputerowych na dłonie (rękawice), ręce lub całą górną część ciała.

Dodatkowym stymulatorem może być wykorzystanie robotów rehabilitacyjnych lub ich uproszczonych wersji jako urządzeń do telerehabilitacji [21].

**DYSKUSJA**

W obszarze usprawniania funkcjonalnego trwa dyskusja, czy wielokrotne powtarzanie (*repetitive practice, repetitive exercise, repetitive task training*), również np. za pomocą robota rehabilitacyjnego, ma większy potencjał niż np. terapia metodą NDT-Bobath. Każda ze stron powołuje się na swoje badania i argumenty, a spór pozostaje dotąd nierozstrzygnięty [22,23]. W przypadku kończyny górnej, a zwłaszcza dłoni, może to wynikać ze specyfiki i zróżnicowania stawianych przed nią zadań funkcjonalnych. Dotyczy to również jednoczesnego ćwiczenia obustronnego kończyn górnych (*simultaneous bilateral training*) [24]. Wydaje się jednak, że do wyciągnięcia jednoznacznego wniosku ciągle brak wystarczającej liczby badań w tym zakresie.

Terapia zrobotyzowana (*robot assisted therapy*) w przypadku kończyn górnych może stanowić znaczącą alternatywę dla dotychczas stosowanych form terapii [25,26]. Roboty rehabilitacyjne, wcześniej stosowane głównie do ćwiczeń dużych stawów kończyn górnych, w ostatnich latach zaczęły być stosowane również do ćwiczeń dłoni [27]. Stało się to możliwe dzięki znaczącemu postępowi technicznemu i przejściu od prostych urządzeń oferujących ruch w pojedynczym stawie kończyny górnej do zaawansowanych urządzeń umożliwiających jednoczesną rehabilitację nadgarstka i palców dłoni (18 stopni swobody, *degrees of*



*freedom* – DOF). Umożliwia to znacznie większe zastosowanie takich rozwiązań, niemniej jednak wymagają one dalszych badań klinicznych na większych grupach pacjentów [27,28,29]. Część publikacji [29,30] wskazuje przy tym na trudności w zakresie oceny efektywności terapii z wykorzystaniem robotów rehabilitacyjnych za pomocą tradycyjnych narzędzi badawczych, np. testów ADL. W publikacjach podkreśla się również, że robot rehabilitacyjny nie może zastępować relacji pacjent – fizjoterapeuta, a jedynie stanowić jej uzupełnienie, np. jako urządzenie zwiększające intensywność i dokładność rehabilitacji [31], lecz nie do końca przydatne w rehabilitacji funkcjonalnej [32].

#### WNIOSKI

1. Z uwagi na niewrażliwe znaczenie funkcji kończyn górnych w życiu człowieka, ich rehabilitacja, bez względu na przyczynę utraty czy ograniczenia, zawsze będzie sta-

nowić bardzo ważny element rehabilitacji i fizjoterapii. Złożoność funkcji kończyn górnych, ich leczenia i rehabilitacji wymaga zwiększenia liczby badań naukowych oraz klinicznych, przekładających się na opracowanie efektywnych metod terapeutycznych oraz znaczący wzrost liczby publikacji z tego zakresu.

2. Zrobotyzowana rehabilitacja funkcji ręki – pomimo dynamicznego rozwoju i opracowania wielu rozwiązań uważanych za efektywne – ciągle stanowi jedynie terapię wspomagającą klasyczne postępowanie fizjoterapeutyczne. Na chwilę obecną trudno prognozować, czy stan ten może ulec zmianie wraz z postępem technicznym w zakresie robotyki medycznej (rehabilitacyjnej).
3. Ze względu na wprowadzanie rozwiązań z omawianego zakresu do praktyki klinicznej niezbędne wydaje się przeprowadzenie badań klinicznych oraz wypracowanie procedur w zakresie najefektywniejszego wykorzystania robotów rehabilitacyjnych w połączeniu z rozwiązaniami dotychczas stosowanymi.

#### PIŚMIENNICTWO

1. Szczehowicz J. Pomiary kątowe zakresu ruchu. Zapis pomiaru metodą SFTR. AWF w Krakowie, Kraków 2004.
2. Pieniążek M., Chwała W., Szczehowicz J. i wsp. Poziom ruchomości w stawach kończyny górnej podczas wykonywania czynności życia codziennego w świetle badań z wykorzystaniem systemu trójwymiarowej analizy ruchu – doniesienie wstępne. *Ortop. Traumatol. Rehab.* 2007; 4: 413–422.
3. Wolińska O., Zwolińska J., Kwolek A. Weryfikacja oceny funkcji ręki w skali Brunnstrom z wykorzystaniem elektronicznego urządzenia do diagnostyki ręki u pacjentów po udarze mózgu. *Prz. Med. Uniw. Rzesz.* 2007; 4: 350–354.
4. Pasternak-Mlądzka I., Dobaczewska R., Otręba D. i wsp. Poprawa funkcji ręki spastycznej u pacjentów po udarze mózgu. *Rehabil. Med.* 2006; 10(3): 21–28.
5. Pieniążek M., Pelczar-Pieniążek M., Szczehowicz J. Dokładność aparaturowania jako podstawowy determinant wyników usprawniania osób po leczeniu operacyjnym uszkodzeń ścięgna zginaczy palców ręki w II strefie urazowej. *Rehabil. Med.* 2004; 8(3): 23–32.
6. MEDLINE/PubMed (U.S. National Library of Medicine) <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed> (data pobrania 26.05.2011 r.).
7. Mikołajewska E., Mikołajewski D. Roboty rehabilitacyjne. *Rehabil. Prakt.* 2010; 4: 49–53.
8. Mikołajewska E., Mikołajewski D. Roboty rehabilitacyjne i pielęgnacyjne. *Mag. Pielęg. Położ.* 2009; 12: 42.
9. Dindorf R. Rozwój i zastosowanie manipulatorów i robotów rehabilitacyjnych. *Pomiary Automatyka Robotyka* 2004; 4: 5–9.
10. Mikołajewska E. Neurorehabilitacja. Zaopatrzenie ortopedyczne. Wydawnictwo Lekarskie PZWL, Warszawa 2009.
11. Baza danych robotyki medycznej MeRoDa (Medical Robotics Database) <http://www.umm.uni-heidelberg.de/apps/orthomeroda/> (data pobrania 26.05.2011 r.).
12. Mikołajewska E., Mikołajewski D. Zastosowania automatyki i robotyki w wózkach dla niepełnosprawnych i egzoszkieletach medycznych. *Pomiary Automatyka Robotyka* 2011; 5: 58–64.
13. Mikołajewska E., Mikołajewski D. Exoskeletons in neurological diseases – current and potential future applications. *Adv. Clin. Exp. Med.* 2011; 2: 227–233.
14. Mikołajewska E., Mikołajewski D. Egzoszkielec jako szczególna forma robota – zastosowania cywilne i wojskowe. *Kwartalnik Bellona* 2011; 1: 160–169.
15. Mikołajewska E. Egzoszkielec HAL 5. *Mag. Pielęg. Położ.* 2007; 5: 42.
16. Mikołajewska E. Lokomat jako element nowoczesnej reedukacji chodu. *Prakt. Fizjoter. Rehabil.* 2010; 10: 15–18.
17. Otfinowski J., Jasiak-Tyrkalska B., Starowicz A. i wsp. Wspomagana komputerowo, skojarzona rehabilitacja zaburzeń poznawczych i funkcji ręki u osób z niedowładem połowicznym po udarze mózgu – doniesienie wstępne. *Neurol. Neurochir. Pol.* 2006; 40(2): 112–118.
18. Mikołajewska E., Mikołajewski D. Inteligentny dom. *Mag. Pielęg. Położ.* 2009; 6: 42.
19. Mikołajewska E., Mikołajewski D. E-learning in the education of people with disabilities. *Adv. Clin. Exp. Med.* 2011; 20: 103–109.
20. Mikołajewska E., Mikołajewski D. Wheelchair development from the perspective of physical therapists and biomedical engineers. *Adv. Clin. Exp. Med.* 2010; 19: 771–776.
21. Mikołajewska E., Mikołajewski D. Telerehabilitacja. *Rehabil. Prakt.* 2011; 1: 64–67.
22. Butefisch C., Hummelsheim H., Denzler P. i wsp. Repetitive training of isolated movements improves the outcome of motor rehabilitation of the centrally paretic hand. *J. Neurol. Sci.* 1995; 130: 59–68.
23. French B., Thomas L. H., Leathley M. J. i wsp. Repetitive task training for improv-

ing functional ability after stroke. *Cochrane Database Syst Rev.* 2007; 4: CD006073.

24. Coupar F., Pollock A., van Wijck F. i wsp. Simultaneous bilateral training for improving arm function after stroke. *Cochrane Database Syst Rev.* 2010; 4: CD006432.

25. Kutner N. G., Zhang R., Butler A. J. i wsp. Quality-of-life change associated with robotic-assisted therapy to improve hand motor function in patients with subacute stroke: A randomized clinical trial. *Phys. Ther.* 2010; 90: 493–504.

26. Zeng J., Sun Y., Jiang L. On-line “automatic pilot” training for hand and arm

motor rehabilitation after stroke. *Med. Hypotheses* 2011; 76: 197–198.

27. Balasubramanian S., Klein J., Burdet E. Robot-assisted rehabilitation of hand function. *Curr. Opin. Neurol.* 2010; 23: 661–670.

28. Krebs H. I., Volpe B. T., Williams D. i wsp. Robot-aided neurorehabilitation: a robot for wrist rehabilitation. *IEEE Trans. Neural. Syst. Rehabil. Eng.* 2007; 15(3): 327–335.

29. Kwakkel G., Kollen B. J., Krebs H. I. Effects of robot-assisted therapy on upper limb recovery after stroke: a systematic review. *Neurorehabil. Neural Repair* 2008; 22: 111–121.

30. Mehrholz J., Platz T., Kugler J. i wsp. Electromechanical and robot-assisted arm training for improving arm function and activities of daily living after stroke. *Cochrane Database Syst Rev.* 2008; 4: CD006876.

31. Hesse S., Mehrholz J., Werner C. Robot-assisted upper and lower limb rehabilitation after stroke: walking and arm/hand function. *Dtsch. Arztebl. Int.* 2008; 105: 330–336.

32. Krebs H. I., Mernoff S., Fasoli S. E. i wsp. A comparison of functional and impairment-based robotic training in severe to moderate chronic stroke: a pilot study. *NeuroRehabilitation* 2008; 23: 81–87.