

**Tomasz GIESKO, Andrzej ZBROWSKI, Wojciech MIZAK**  
Instytut Technologii Eksploatacji – PIB, Radom

## **MODEL MECHATRONICZNEGO SYSTEMU DO WSPOMAGANIA REHABILITACJI RUCHOWEJ**

### **Słowa kluczowe**

Rehabilitacja ruchowa, system mechatroniczny, manipulator, telerehabilitacja.

### **Streszczenie**

W rehabilitacji pacjentów z dysfunkcjami narządów ruchu coraz częściej są wykorzystywane urządzenia mechatroniczne. W artykule zaprezentowano koncepcję systemu mechatronicznego do wspomagania rehabilitacji ruchowej kończyn dolnych. W systemie przewidziano zastosowanie serwonapędów, enkoderów i czujników siły. Koncepcja programu sterującego zakłada realizację ćwiczeń w opcji pasywnej lub aktywnej. Ważnymi walorami rozwiązania będą personalizacja programu ćwiczeń i jego parametrów do potrzeb pacjenta oraz analiza efektów procesu terapeutycznego. Interfejs Internet/Intranet umożliwi zastosowanie funkcji telemonitoringu, a także zdalny dostęp do bazy danych.

### **Wprowadzenie**

Problem ograniczeń możliwości ruchowych ludzi będących konsekwencją urazów, chorób lub procesów starzenia wymaga pilnych i efektywnych rozwiązań. Ocenia się, że w najbliższych dekadach ponad 30% populacji będzie cierpieć na upośledzenie narządów ruchu [1, 2]. Liczne prace badawcze w dziedzinie neurorehabilitacji potwierdzają istotną rolę programowanych ćwiczeń w procesie odzyskiwania sprawności ruchowej przez pacjenta [3, 4]. Metody wykorzystujące techniki ćwiczeń aktywnych z kontrolą siły oddziaływania na

kończynę są obecnie jednym z głównych kierunków nowoczesnej neurorehabilitacji [5]. Klasyczne techniki rehabilitacyjne bazują na indywidualnym kontakcie pacjent–terapeuta i manualnej realizacji ćwiczeń, co nie zapewnia ich wysokiej efektywności [6]. Wyniki prowadzonych licznych badań potwierdzają znaczące, pozytywne efekty rehabilitacji w ramach indywidualnych programów ćwiczeń, w których wykorzystuje się urządzenia wspomagające z układami sterowania parametrami roboczymi [7, 8].

Od lat 90. opracowywane są coraz bardziej zaawansowane, zrobotyzowane urządzenia i systemy mechatroniczne do wspomagania ćwiczeń rehabilitacyjnych. Pierwszym takim znaczącym rozwiązaniem był manipulator MIT-Manus do rehabilitacji ręki, w którym zastosowano zrobotyzowane ramię o 2 stopniach swobody [9]. Kolejnym osiągnięciem był robot Anklebot do rehabilitacji stawu kolanowego, w którym ruchy w 3 stopniach swobody są realizowane za pomocą silników DC, enkoderów i programowalnego sterownika [10]. W urządzeniu zastosowano także układy zabezpieczeń w przypadku niepoprawnego działania napędów. Wiele prowadzonych prac badawczych dotyczy wykorzystania techniki komputerowej do realizacji dedykowanych programów ćwiczeń z możliwością ustalania parametrów kinematycznych, kształtu trajektorii ruchu, a także algorytmów interakcji pomiędzy pacjentem i maszyną w celu realizacji ćwiczeń w trybie pasywnym lub aktywnym [11]. Obecnie najnowsze urządzenia do rehabilitacji ruchowej są zintegrowanymi systemami mechatronicznymi, w których zasadniczą rolę odgrywa komputerowy system sterowania wspomagany przez elektroniczne czujniki położenia, siły i momentu do kontroli działania układów wykonawczych. W systemach sterowania stosowane są zaawansowane algorytmy, w tym wykorzystujące metody logiki rozmytej oraz sieci neuronowe [12, 13]. Efektem połączenia funkcji pracy w trybie pasywnym i aktywnym są nowatorskie systemy hybrydowe [14, 15].

W procesie projektowania i implementacji systemów mechatronicznych wspomagających rehabilitację ruchową niezbędne jest zastosowanie nowoczesnych narzędzi komputerowych umożliwiających modelowanie, symulację, weryfikację i optymalizację powstających rozwiązań [16]. Podstawowym warunkiem jest jednak rozszerzona baza wiedzy z uwagi na interdyscyplinarny charakter tych przedsięwzięć, która obejmuje dziedziny inżynierskie, jak mechatronika i informatyka oraz medyczne, jak rehabilitacja i neurofizjologia. Istotnym i nieodłącznym etapem implementacji i weryfikacji opracowanych urządzeń są badania kliniczne [17]. Zastosowanie technik informatycznych otwiera nowe perspektywy zwiększania efektywności rehabilitacji poprzez wprowadzenie czynnika motywującego, jakim jest możliwość aktywnej współpracy pacjenta z systemem mechatronicznym. Takie podejście zostało zastosowane m.in. w robotach rehabilitacyjnych Lokomat [18] i ARMin [19], w których możliwa jest obserwacja on-line współdziałania pacjent–maszyna. Dalszy rozwój tego kierunku prac badawczych zaowocował koncepcjami zastosowania rzeczywistości wirtu-

alnej [20]. Przykładami najbardziej zaawansowanych rozwiązań są roboty PHANToM [21] i Rutgers Ankle [22]. Uzyskiwane rezultaty eksperymentalnych ćwiczeń rehabilitacyjnych potwierdzają skuteczność nowych metod [23].

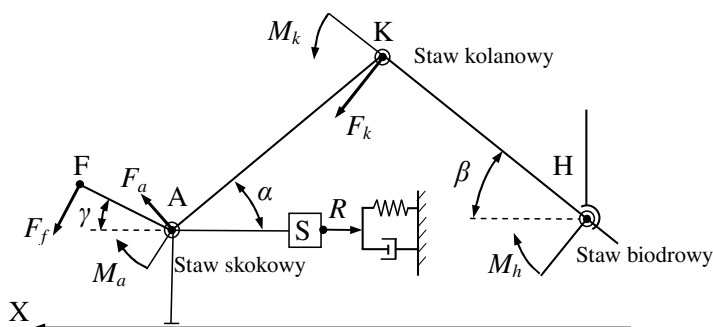
Wykorzystując postępy technologii teleinformatycznych, w systemach mechatronicznych do wspomagania rehabilitacji przewiduje się zastosowanie funkcji telemonitoringu, co umożliwi realizowanie telerehabilitacji w ramach sieci [24, 25]. W takim systemie pacjent będzie mógł korzystać z urządzeń tego samego typu w dowolnym miejscu, dzięki możliwości zdalnego dostępu do baz danych i nadzorowania przebiegu ćwiczeń przez rehabilitanta.

W procesie rozwoju metod wykorzystujących technologie mechatroniczne do wspomagania rehabilitacji ruchowej podstawowe znaczenie mają następujące zagadnienia, które wymagają dalszych zaawansowanych prac badawczych [26–27]:

- identyfikacja modeli neurofizjologicznych w procesie rehabilitacji;
- algorytmy programów ćwiczeń uwzględniające interakcje pacjent–maszyna;
- elastyczność i możliwość adaptacji systemu do potrzeb pacjenta;
- zastosowanie nowych technologii;
- bezpieczeństwo użytkowników;
- procedury testów i certyfikacji;
- diagnostyka i obsługa serwisowa w systemie sieciowym.

## 1. Metoda

Opracowany model kinematyczny manipulatora do rehabilitacji kończyn dolnych przedstawia rys. 1.



Rys. 1. Schemat układu kinematycznego manipulatora do rehabilitacji kończyn dolnych

W opracowanej koncepcji modelowego systemu do rehabilitacji kończyn dolnych przewidziano możliwość wykonywania ćwiczeń pasywnych i aktywnych w obrębie stawu biodrowego, stawu kolanowego i stawu skokowego.

W trakcie ćwiczeń pasywnych ruch kończyny jest wymuszany przez manipulator sterowany z poziomu komputera i nadzorowany przez rehabilitanta. Podczas ćwiczeń aktywnych pacjent samodzielnie wykonuje ruchy kończyną, pokonując zaprogramowane siły oporu mechanizmów. Podstawowe parametry ruchu, jak przemieszczenie, siła, prędkość są wyznaczone w systemie na podstawie danych z czujników.

W modelu staw skokowy i kolanowy są prezentowane jako przeguby obrotowe o jednym stopniu swobody. Staw biodrowy jest przedstawiony jako przegub kulisty o trzech stopniach swobody. Momenty w przegubach generowane przez układ mięśniowy równoważone są przez odpowiedni moment siły znajdującej się na końcu ogniwa ( $F_k$  – siła przyłożona do stawu kolanowego,  $F_a$  – siła przyłożona do stawu skokowego,  $F_f$  – siła przyłożona do stopy), co przedstawiają następujące równania:

$$F_k = \frac{M_h}{HK} \quad (1)$$

$$F_a = \frac{M_k}{AK} \quad (2)$$

$$F_f = \frac{M_a}{AF} \quad (3)$$

Układ znajduje się w spoczynku, gdy siła generowana przez pacjenta jest równoważona przez reakcję  $R$  manipulatora, mierzoną za pomocą czujnika  $S$ . Siła  $R$  jest reakcją dla układu sił  $F_k$ ,  $F_a$  i  $F_f$ , co przedstawia równanie:

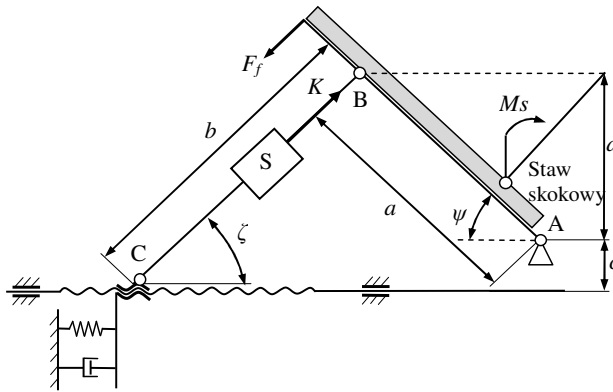
$$R = F_k \cdot \sin \beta + F_a \cdot \sin \alpha + F_f \cdot \sin \gamma \quad (4)$$

Układ mechaniczny manipulatora umożliwia pomiar siły nacisku stopy pacjenta wywieranego jedynie w wyniku działania momentu w stawie skokowym. W tym przypadku przesuw wzdłużny stopy jest zablokowany, natomiast aktywny jest obrotowy stopień swobody w stawie skokowym.

Układ kinematyczny manipulatora stopy jest mechanizmem wahaczowym ABC (rys. 2). Węzeł  $C$  jest parą śrubową, zaś węzły  $A$  i  $B$  to pary obrotowe o jednym stopniu swobody. Mechanizm jest wyposażony w czujnik  $S$  do pomiaru siły  $K$  i enkoder do pomiaru kąta pochylecia podpory stopy  $\psi$ .

Układ znajduje się w równowadze, gdy:

$$F_f \cdot \sin \psi - K \cdot \cos \xi = 0 \quad (5)$$



Rys. 2. Schemat funkcjonalny mechanizmu wahaczowego realizującego ruch stopy i stawu skokowego

Na podstawie zmierzonej wartości kąta  $\psi$  można wyznaczyć:

$$\cos \xi = \frac{1}{b} \sqrt{b^2 - (a \cdot \sin \psi + c)^2} \quad (6)$$

Wykorzystując zależność (5), wyznaczona siła reakcji  $K$  jest przedstawiona następująco:

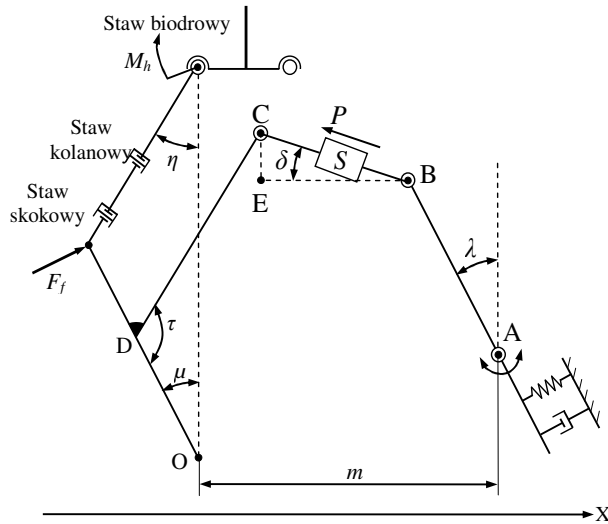
$$K = \frac{b \cdot F_f \cdot \sin \psi}{\sqrt{b^2 - (a \cdot \sin \psi + c)^2}} \quad (7)$$

Model kinematyczny manipulatora dla ćwiczeń odwodzenia i przywodzenia kończyny w stawie biodrowym przedstawiono na rys. 3.

Układ kinematyczny tworzy czworobok przegubowy, w którym efektor w postaci wahacza  $OD$  związany jest ze stopą kończyny. Moment odwodzenia w stawie biodrowym jest równoważony momentem siły przyłożonym do stopy pacjenta lub efektora manipulatora. Przetwornik siły  $S$  jest elementem ramienia  $BC$ . Ruch wahadłowy efektora powoduje przywodzenie i odwodzenie kończyny dolnej w stawie biodrowym przy założeniu, że staw skokowy i kolanowy są przegubami z jednym stopniem swobody. W modelu geometrycznym długości ramion  $OD$ ,  $DC$ ,  $CB$ ,  $BA$  oraz kąt  $\tau$  są znane i wynikają z konstrukcji manipulatora. Wartości kątów  $\lambda$  oraz  $\mu$  są mierzone za pomocą wbudowanych enkoderów obrotowych.

Układ jest w równowadze, gdy suma rzutów wektorów sił na oś  $X$  wynosi zero:

$$F_f \cdot \cos \mu - P \cdot \cos \delta = 0 \quad (8)$$



Rys. 3. Schemat funkcjonalny mechaniki ruchu stawu biodrowego

Z geometrii układu wynika:

$$\cos \delta = \frac{EB}{BC} \quad (9)$$

oraz:

$$EB = DO \cdot \sin \mu + m - DC \cdot \cos \left( \tau - \frac{\pi}{2} + \mu \right) - AB \cdot \sin \lambda \quad (10)$$

Korzystając z powyższych zależności, siła  $P$  może być przedstawiona następująco:

$$P = \frac{F_f \cdot \cos \mu \cdot CD}{DO \cdot \sin \mu + m - DC \cdot \cos \left( \tau - \frac{\pi}{2} + \mu \right) - AB \cdot \sin \lambda} \quad (11)$$

Przedstawiony model manipulatora umożliwia wykonywanie ćwiczeń kończyny dolnej w obrębie stawu biodrowego, stawu kolanowego i stawu skokowego.

Na etapie koncepcji systemu mechatronicznego do wspomagania rehabilitacji przewidziano następujące opcje pracy:

- ćwiczenia pasywne z kontrolą parametrów kinematycznych;

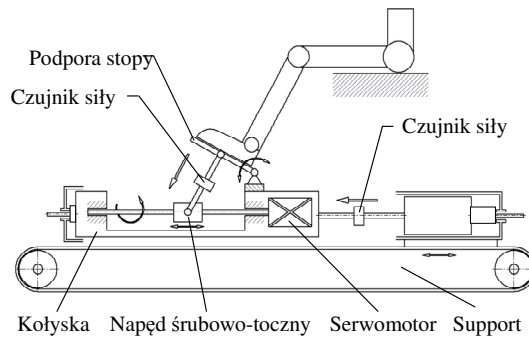
- ćwiczenia aktywne, w których trakcie pacjent będzie pokonywał siły oporu mechanizmów.

Przewidywany zakres ćwiczeń obejmuje:

- ćwiczenia stawu skokowego i stopy;
- ruchy zginające i wyprostne kończyny w jednej płaszczyźnie;
- ruchy odwodzące i przywodzące kończyny.

## 2. Model fizyczny manipulatora

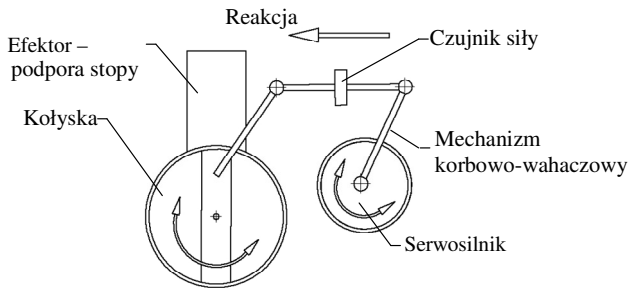
Manipulator jest zintegrowaną konstrukcją, która zawiera układ zmiany położenia stopy w stawie skokowym oraz układ zmiany położenia liniowego i kąтового kończyny (rys. 4).



Rys. 4. Schemat manipulatora

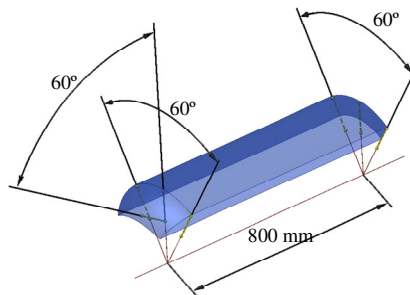
Stopa pacjenta spoczywa na platformie, której położenie jest ustalane za pomocą mechanizmu wahaczowego. Mechanizm położenia platformy posiada przekładnię śrubowo-toczną napędzaną serwosilnikiem i ciągną z czujnikiem siły. Mechanizm pozycjonowania platformy stopy jest zamocowany na kołysce, która umożliwia zmianę kąta pochylenia bocznej kończyny w stosunku do płaszczyzny pionowej. Ten stopień swobody jest wykorzystywany w trakcie ćwiczeń odwodzenia i przywodzenia kończyny. Mechanizm pozycjonowania platformy stopy i pochylenia bocznej kończyny osadzony jest na suporcie. Suport wykonuje ruch liniowy wykorzystując napęd liniowy z paskiem zębatym poruszającym się za pomocą serwosilnika. Oddziaływanie na kończynę wzdłuż osi głównej jest mierzone za pomocą czujnika siły.

Mechanizm wykonujący ruch odwodzący i przywodzący kończyny przedstawia rys. 5. Zmiana położenia kąтового kończyny jest wymuszana poprzez pochylenie platformy, na której oparta jest stopa. Napęd kołyski jest realizowany za pomocą mechanizmu korbowo-wahaczowego.



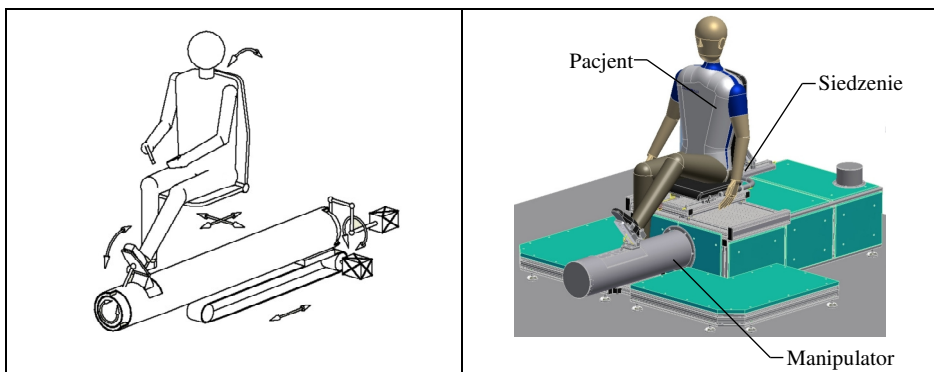
Rys. 5. Schemat układu kołyśki z mechanizmem korbowo-wahaczowym

Przestrzeń robocza manipulatora o 3 stopniach swobody jest pokazana na rys. 6.



Rys. 6. Przestrzeń robocza manipulatora

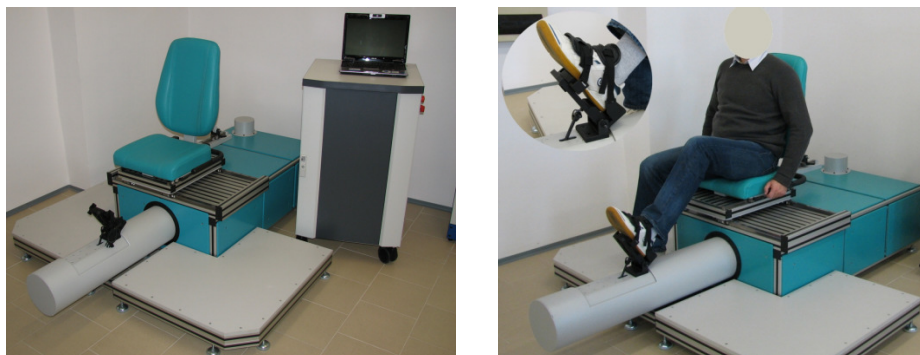
W trakcie ćwiczeń pacjent znajduje się na siedzeniu wyposażonym w regulację położenia, w zależności od tego, która kończyna jest poddawana rehabilitacji oraz od wzrostu pacjenta (rys. 7).



Rys. 7. Schemat obrazujący pozycję pacjenta



Fotografie wykonanego manipulatora w wersji prototypowej przedstawiono na rys. 8. Podczas projektowania konstrukcji urządzenia uwzględniono szczególne wymagania dla urządzeń medycznych. Elementy ruchome są odizolowane od otoczenia za pomocą osłon.



Rys. 8. Stanowisko do rehabilitacji kończyny dolnej w wersji prototypowej

Wizualizacja trajektorii ruchu kończyny odbywać się będzie na monitorze. Dzięki temu w trakcie ćwiczeń aktywnych pacjent ma możliwość śledzenia, w jakim stopniu wykonywane ruchy są zgodne z trajektorią wzorcową. Projektowane oprogramowanie systemu umożliwić będzie archiwizację danych z wykonywanych ćwiczeń, wykorzystywanych do analizy uzyskiwanych postępów przez pacjenta. Ponadto w systemie przewidziano zastosowanie interfejsu Intranet/Internet i funkcji telemonitoringu do zdalnego nadzorowania urządzenia i przebiegu procesu rehabilitacji.

## Podsumowanie

Opracowany system mechatroniczny z manipulatorem o trzech stopniach swobody umożliwi wykonywanie ćwiczeń pasywnych i aktywnych kończyny dolnej obejmujących staw biodrowy, kolanowy i skokowy. Opcje ćwiczeń uwzględniają także możliwość realizacji ruchów kończyny z redukcją stopni swobody. W ten sposób mogą być prowadzone ćwiczenia w wybranym zakresie ograniczonym do stopy i stawu skokowego, ruchów wyprostnych i zginających w zakresie stawu kolanowego, a także ruchów przywodzących i odwodzących stawu biodrowego. Najbardziej zaawansowane ćwiczenia będą obejmować złożenie ruchów, wykorzystując jednocześnie trzy stopnie swobody. Konstrukcja urządzenia jest rozwiązaniem oryginalnym, zapewnia wymaganą funkcjonalność, ergonomię, a także bezpieczeństwo pacjenta i terapeuty. Na etapie jej projektowania wykorzystano modelowanie komputerowe. System sterowania jest obecnie na etapie opracowania. Wyróżniającym walorem rozwiązania jest wizu-

alizacja trajektorii ruchu na monitorze, co przyczynia się do intensyfikacji rehabilitacji, wykorzystując efekt kooperacji pacjent–system. Uwzględniając aktualne trendy w rehabilitacji, przewidziano zastosowanie telemonitoringu, który umożliwi zdalny serwis urządzenia oraz włączenie go do sieciowego systemu telerehabilitacji.

Zaplanowanym kolejnym etapem rozwoju prototypu jest uruchomienie systemu sterowania oraz przedkliniczne badania eksperymentalne.

## Bibliografia

1. Cooper R.A., Dicianno B.E., Brewer B., LoPresti E., Ding D., Simpson R., Grindle G. and Wang H.: Perspective on intelligent devices and environments in medical rehabilitation. *Medical Engineering & Physics* 30 (2008), p.1387–1398.
2. Krebs H.I.: Robot-Mediated Movement Therapy: a Tool for Training and Evaluation. *European Symposium Technical Aids for Rehabilitation – TAR 2007*, Technical University of Berlin.
3. Sunderland A., Tinson D.J., Bradley E.L., Fletcher D., Langton H.R. and Wade D.T.: Enhanced physical therapy improves recovery of arm function after stroke, A randomized control trial. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry* Vol. 55 (1992), p. 530–535.
4. Aisen M.L., Krebs H.I., McDowell F., Hogan N. and Volpe B.T.: The effect of robot assisted therapy and rehabilitative training on motor recovery following stroke. *Archives of Neurology*, vol. 54, 1997, p. 443–446.
5. Dromerick A.W., Lum P.S., and Hidler J.: Activity-Based Therapies. *The Journal of the American Society for Experimental NeuroTherapeutics* Vol. 3, No. 4 (2006), p. 428–438.
6. Johnson M.J.: Recent trends in robot-assisted therapy environments to improve real-life functional performance after stroke. *Journal of Neuro-Engineering and Rehabilitation* 2006, 3:29.
7. Dong S., Lu K.-Q., Sun J. Q. and Rudolph K.: Rehabilitation device with variable resistance and intelligent control. *Medical Engineering & Physics* 27 (2005), p. 249–255.
8. Erol D., Mallapragada V., Sarkar N., Uswatte G. and Taub E.: A New Control Approach to Robot Assisted Rehabilitation. *Proceedings of the IEEE 9th International Conference on Rehabilitation Robotics* (2005), p. 323–328.
9. Hogan N., Krebs H.I., J., P. Srikrishna, and Sharon A.: MIT-MANUS: A workstation Charnnarong for manual therapy and training. *Proc. Int. Workshop Robot Human Commun.*, (1992), p. 161–165.
10. Roy A., Krebs H.I., Williams D.J., Bever Ch.T., Forrester L.W., Macko R.M. and Hogan N.: Robot-Aided Neurorehabilitation: A Novel

- Robot for Ankle Rehabilitation. *IEEE Transactions on Robotics* Vol. 25, Issue 3, (2009), p. 569–582.
11. Hesse S., Schmidt H. and Werner C.: Machines to support motor rehabilitation after stroke: 10 years of experience in Berlin. *Journal of Rehabilitation Research&Development* Vol. 43, number 1 (2006), p. 671–678.
  12. Ho H.-J., Chen T.-Ch.: Motorized CPM/CAM physiotherapy device with sliding-mode Fuzzy Neural Network control loop. *Computer Methods and Programs in Biomedicine* 96 (2009), p. 96–107.
  13. Lin C.-C. K., Ju M.-S., Chen S.-M. and Pan B.-W.: A Specialized Robot for Ankle Rehabilitation and Evaluation. *Journal of Medical and Biological Engineering*, 28(2) (2008), p. 79–86.
  14. Hesse S., Schulte-Tigges G., Konrad M., Bardeleben A. and Werner C.: Robot-Assisted Arm Trainer for the Passive and Active Practice of Bilateral Forearm and Wrist Movements in Hemiparetic Subjects. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation* Vol 84 (2003), p. 915–920.
  15. Schmidt H., Werner C., Bernhardt R., Hesse S. and Krüger J.: Machines and robots to support motor rehabilitation after stroke: 10 years of experience in Berlin. *European Symposium Technical Aids for Rehabilitation – TAR 2007*, Technical University of Berlin.
  16. Bradley D., Acosta-Marquez C., Hawley M., Brownsell S., Enderby P. and Mawson S.: NeXOS – The design, development and evaluation of a rehabilitation system for the lower limbs. *Mechatronics* 19 (2009), p. 247–257.
  17. Winstein C., Wing A. M. and Whittall J.: Motor control and learning principles for rehabilitation of upper limb movements after brain injury. In: J. Grafman and I.H. Robertson (Eds), *Handbook of Neuropsychology*, Vol. 9, (2003), p. 77–137.
  18. Hidler J., Wisman W. and Neckel N.: Kinematic trajectories while walking within the Lokomat robotic gait-orthosis. *Clinical Biomechanics* 23 (2008), p. 1251–1259.
  19. Riener R.: Multimodal patient-cooperative rehabilitation robotics. *World Congress of Biomechanics, Munich, Journal of Biomechanics*, vol. 39, suppl. 1, p. S210 (2006).
  20. Tsetserukou D., Sato K. and Tachi S.: ExoInterfaces: novel exoskeleton haptic interfaces for virtual reality, augmented sport and rehabilitation, in *Proc. the First ACM International Conference Augmented Human*, (2010), p. 1–6.
  21. <http://www.sensable.com/products-haptic-devices.htm>
  22. <http://www.caip.rutgers.edu/vrlab/projects/ankle/ankle.html>
  23. Sveistrup H.: Motor rehabilitation using virtual reality. *Journal of Neuro-Engineering and Rehabilitation* 2004, 1:10.

24. Zampolini M. et al.: Tele-rehabilitation: present and future. *Annali dell'Istituto Superiore di Sanità* Vol. 44, No. 2 (2008), p. 125–134.
25. Carignan C.R., Krebs H.I.: Telerehabilitation robotics: Bright lights, big future? *Journal of Rehabilitation Research & Development* Vol. 43, Number 5 (2006), p. 695–710.
26. Mazzoleni S., Dario P., Carrozza M.C. and Guglielmelli E.: Application of robotic and mechatronic systems to neurorehabilitation, in *Mechatronic Systems Applications*, edited by A. Milella, D. Di Paola and G. Mechatronic Systems Applications INTECH 2010.
27. Hu H.: Research trends in Medical & Rehabilitation Robotics. *IEEE ICIA 2010 Conference Workshop Talk II*, Harbin, China (2010).

Recenzent:  
**Jerzy OSIŃSKI**

## **Model mechatronic system to support motor rehabilitation**

### **Key words**

Motor rehabilitation, mechatronic system, manipulator, telerehabilitation.

### **Summary**

Mechatronic systems are increasingly used in motor rehabilitation therapy of patients with motion disability. This paper presents a concept of the mechatronic system to the support motor rehabilitation of lower limbs. The system uses servomotors, encoders, and force sensors. The concept of system software includes exercise in a passive motion mode and an active motion mode. Personalisation of the exercise programme and parameters suitable for patient's needs as well as an analysis of therapy progress are significant advantages of this solution. The Internet/Intranet connection will enable the telemonitoring of the system and remote access to the data base.