

ZAŁOŻENIA MECHATRONICZNEGO SYSTEMU WSPOMAGANIA REHABILITACJI PALCÓW WYKORZYSTUJĄCEGO RZECZYWIŚTOŚĆ WIRTUALNĄ I GRY KOMPUTEROWE

Streszczenie: W artykule opisano prowadzone w Centralnym Instytucie Ochrony Pracy – Państwowym Instytucie Badawczym prace na rzecz stworzenia mechatronicznego systemu wspomagania rehabilitacji palców wykorzystującego rzeczywistość wirtualną i gry komputerowe. W ramach dotychczasowych prac opracowano system wspomagania rehabilitacji kończyn górnych z wykorzystaniem techniki rzeczywistości wirtualnej. Program rehabilitacyjny ubrany został w atrakcyjną formę gry komputerowej prezentowanej pacjentowi za pomocą sprzętu rzeczywistości wirtualnej. Celem obecnych prac jest opracowanie systemu mechatronicznego poszerzającego możliwości opracowanego w ramach poprzednich prac systemu wspomagania rehabilitacji o:

- *możliwość wykonywania ruchów czynnych w stawie promieniowo-nadgarstkowym i w stawach palców,*
- *możliwość wykonywania ruchów biernych w wybranych stawach w obrębie ręki.*

CONCEPT OF THE ROBOTIC SYSTEM FOR HAND REHABILITATION USING COMPUTER GAMES AND VIRTUAL REALITY

Abstract: The article describes works conducted in the Central Institute for Labour Protection – National Research Institute aimed at creating a robotic system for hand rehabilitation using computer games and virtual reality. In the context of previous work the upper limbs rehabilitation system was developed. Rehabilitation program was dressed in an attractive form of a computer game presented to the patient by means of virtual reality equipment. The aim of the present study is to develop the robotic system expanding capabilities of the system developed in the previous work by:

- *the ability to perform active movements in the wrist and finger joints,*
- *the ability to perform passive movements in selected joints of the hand.*

Słowa kluczowe: egzoszkielec, rehabilitacja, robot

Keywords: exoskeleton, rehabilitation, robot

1. WPROWADZENIE

Przywrócenie sprawności manualnej ręki jest jednym z kluczowych zagadnień rehabilitacji, ważnym zarówno z punktu widzenia życia codziennego, jak i pracy zawodowej. Na ten aspekt kładziony jest więc szczególny nacisk podczas procesu rehabilitacji. Ręka człowieka umożliwia wykonywanie wielu skomplikowanych czynności manipulacyjnych, co wiąże się z jej złożoną budową. Skomplikowany układ kości połączonych stawami napędzany jest przez wiele mięśni. Do tego dochodzi odpowiednie unerwienie i ukrwienie. Wzajemna współpraca tych elementów pozwala na wykonywanie różnorodnych ruchów. Do normalnego funkcjonowania ręki niezbędna jest odpowiednia siła mięśniowa oraz koordynacja ruchowa. Prawidłowe działanie tak złożonej struktury umożliwia uzyskanie dużej precyzji ruchów, jak też sprawia, że ręka może podjąć ciężką pracę. Obrębie ręki może dochodzić do zmian chorobowych oraz licznych urazów, kontuzji bądź przeciążeń wywołanych przekroczeniem ruchomości zakresu fizjologicznego. Wymaga to leczenia zachowawczego lub operacyjnego, a także usprawniającej rehabilitacji.

W artykule opisano prowadzone w Centralnym Instytucie Ochrony Pracy – Państwowym Instytucie Badawczym (CIOP-PIB) prace mające na celu stworzenie mechatronicznego systemu wspomagania rehabilitacji palców wykorzystującego rzeczywistość wirtualną i gry komputerowe.

2. STAN WIEDZY

Skuteczność rehabilitacji jest silnie uzależniona od systematyczności wykonywania ćwiczeń [1]. Jednak zarówno praktyka terapeutyczna, jak i wyniki opisanych w literaturze badań (np. [2, 3]) pokazują, że spora grupa pacjentów wykonuje ćwiczenia rehabilitacyjne nieregularnie bądź całkiem przerywa rehabilitację. Według różnych szacunków od 60 do 80% pacjentów ma problemy z regularnością terapii rehabilitacyjnej wykonywanej w domu, a 10% całkowicie zaprzestaje rehabilitacji. Jednocześnie badania pokazują, że motywacja pacjenta ma bardzo duży wpływ na postępy rehabilitacji. Właśnie brak wystarczającej motywacji wskazywany jest jako główna przyczyna problemów z systematycznością terapii [4, 5]. Bardzo obiecującym sposobem rozwiązania tego problemu jest wykorzystanie gier komputerowych i rzeczywistości wirtualnej do wspomagania procesu rehabilitacji [6]. Ma to znaczenie zwłaszcza podczas wykonywania ćwiczeń w domu pacjenta.

Niektóre ćwiczenia rehabilitacyjne wymagają wspomagania ze strony terapeuty. Zadanie to ułatwić mają systemy mechatroniczne, wspierające zarówno ćwiczenia czynne, jak i bierne. Systemy takie mogą mieć zarówno formę manipulatorów stacjonarnych stykających się z kończyną pacjenta tylko w wybranych miejscach, jak i egzoszkieleatów, czyli wyposażonych w siłowniki systemów umieszczonych na kończynie. W ostatnich latach podejmowanych jest wiele prac zmierzających do wykorzystania systemów mechatronicznych w procesie rehabilitacji. Ich zadaniem jest wspomaganie bądź zastępowanie terapeuty podczas wykonywania ćwiczeń biernych lub czynnych oporowych oraz wspomaganych. Ma to znaczenie podczas prowadzenia rehabilitacji w ośrodku, ale przede wszystkim w domu pacjenta. Jedną z ciekawszych prac w tym zakresie przedstawiona została w publikacji [7], gdzie robot umożliwiający ruchy ręki w sześciu stopniach swobody sprzężony został z systemem aktywnie wspomagającym ruchy palców. Dzięki temu możliwe było prowadzenie rehabilitacji ręki równoległe z rehabilitacją całej kończyny górnej, co – jak podkreślają autorzy – jest niezwykle korzystne z punktu widzenia skuteczności rehabilitacji.

Mówiąc o robotach wspomagających rehabilitację kończyny górnej, należy wspomnieć o systemie przygotowanym w Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów w Warszawie. Opracowany został tam robot rehabilitacyjny RENUS-1, umożliwiający prowadzenie ćwiczeń rehabilitacyjnych zarówno czynnych, jak i biernych, z możliwością realizacji trajektorii przestrzennych w całym zakresie ruchów kończyny górnej człowieka [8]. Robot ten umożliwia rehabilitację w zakresie ruchów w obręczy stawu ramiennego i łokciowego.

Jak pokazują wyniki badań (np. [9, 10]), rehabilitacja prowadzona z wykorzystaniem robotów może być skuteczniejsza niż prowadzona klasycznymi metodami, roboty rehabilitacyjne mają jednak poważne wady. Przede wszystkim koszt takich urządzeń jest wysoki – przykładowy koszt robota rehabilitacyjnego przytoczony w pracy [11] to 200 000 USD. Stanowi to poważne ograniczenia na drodze do ich upowszechnienia. Dodatkowo są to urządzenia stosunkowo duże, ciężkie, o mocno ograniczonej mobilności. Z tego właśnie powodu wiele zespołów na całym świecie podejmując prace nad systemami rehabilitacyjnymi, rezygnuje z wykorzystania rozbudowanych robotów, tworząc systemy znacznie tańsze i bardziej poręczne. Dzięki tym zaletom mogą być one stosowane jako kompletne stanowiska do zdalnej rehabilitacji, również w domu pacjenta. Jako przykład podać można opracowany w Szwecji system składający się z wyświetlacza, okularów umożliwiających przestrzenne widzenie oraz niedużego urządzenia typu haptic [12]. Przedstawione wstępne wyniki badań pozwalają na pozytywną ocenę wykorzystania takiego systemu.

Opisany w artykule system będzie łączył zalety mechatronicznego wspomagania rehabilitacji palców i dłoni z korzyściami wynikającymi z wykorzystania systemu rzeczywistości wirtualnej. Opracowany system mechatroniczny będzie stanowił uzupełnienie opartego na rzeczywistości wirtualnej systemu opracowanego w ramach dotychczasowych prac prowadzonych w CIOP-PIB.

3. DOTYCHCZASOWE PRACE

W ramach dotychczasowych prac w CIOP-PIB opracowano system wspomagania rehabilitacji kończyn górnych z wykorzystaniem technik rzeczywistości wirtualnej i gier komputerowych [13]. Podczas tworzenia tego systemu przyjęto następujące założenia:

- system powinien umożliwiać wykonywanie ćwiczeń rehabilitacyjnych w zakresie stawu barkowego, łokciowego oraz nadgarstka;
- powinien być stosunkowo niedrogi, co ma zapewnić powszechne stosowanie;
- musi więc umożliwiać zdalne nadzorowanie postępów przez terapeutę dzięki połączeniu internetowemu, dzięki czemu będzie istniała możliwość stosowania go zarówno w ośrodku rehabilitacji, jak i w domu pacjenta;
- powinien zawierać moduł umożliwiający tworzenie programów rehabilitacji w zależności od indywidualnych potrzeb pacjenta.

Program rehabilitacji ma formę gry komputerowej, co pozwala przenieść uwagę pacjenta z problemów ruchowych na wykonywane w grze zadanie. Ma to pozytywny wpływ na motywację. Obsługa systemu wspomagania rehabilitacji odbywa się w środowisku rzeczywistości wirtualnej, co zwiększa atrakcyjność gry. Dodatkowo możliwość przestrzennego widzenia (stereowizja) ułatwia wykonywanie ruchów rehabilitacyjnych po trajektoriach przestrzennych.

4. ZAŁOŻENIA MECHATRONICZNEGO SYSTEMU WSPOMAGANIA REHABILITACJI RUCHOWEJ PALCÓW ORAZ NADGARSTKA

Celem obecnych prac prowadzonych w CIOP-PIB jest opracowanie systemu mechatronicznego poszerzającego możliwości opisanego w poprzednim rozdziale systemu wspomagania rehabilitacji o:

- możliwość wykonywania ruchów czynnych w stawie promieniowo-nadgarstkowym i w stawach palców,
- możliwość wykonywania ruchów biernych w wybranych stawach w obrębie ręki.

Zadanie to podzielone zostało na dwa zagadnienia: rejestracja ruchu oraz wykonywanie ruchów biernych.

4.1. Rejestracja ruchu

Zagadnienie rejestracji ruchu możemy zdefiniować jako wyznaczanie położenia i rotacji obiektów poruszających w przestrzeni. W zagadnieniach związanych z rehabilitacją obiekty te to poszczególne części ciała człowieka w trakcie wykonywania określonych ruchów. Zagadnienie rejestracji ruchu sprowadza się więc do zapisania w pamięci komputera bądź na nośniku danych współrzędnych liniowych i kątowych określonych punktów na ciele lub kątów w stawach w funkcji czasu.

Istnieje kilka metod rejestracji ruchu człowieka. Najpowszechniejsze z nich to metody optyczne, magnetyczne, inercyjne, mechaniczne oraz hybrydowe [15]. Do rejestracji ruchu całego ciała oraz kończyn człowieka może być zasadniczo wykorzystana z zadowalającym skutkiem każda z wymienionych metod. Inaczej sprawa wygląda, gdy konieczna jest dodatkowa rejestracja ruchów palców. W porównaniu do całych kończyn trajektoria ruchu palców jest niewielka. Jednocześnie niezwykle ważna jest dokładność rejestracji umożliwiająca rozpoznanie precyzyjnych ruchów palców. W związku z tym systemy wykorzystywane do rejestracji ruchu całego ciała człowieka nie zawsze mogą być w tym celu wykorzystane. W komercyjnie dostępnych urządzeniach mających na celu rejestrację ruchu palców najczęściej wykorzystywane są tensometryczne czujniki zgięcia (np. w rękawicach www.cyberglovesystems.com, www.5dt.com). Mają one postać podłużnych pasków tworzywa. Dzięki zastosowaniu odpowiedniego układu pomiarowego można wyznaczyć kąt zgięcia takiego czujnika. Czujniki mocowane są na rękę za pomocą odpowiedniej rękawicy. W celu rejestracji ruchu palców stosowane jest od 5 do 22 sensorów na każdą rękę. Ze względu na niski koszt czujników zgięcia i systemu pomiarowego rozwiązanie takie pozwala na uzyskanie niedrogiego systemu rejestracji ruchu palców. Dodatkowo całe urządzenie może być niewiele większe niż zwykła rękawica. Wadą tego rozwiązania jest konieczność precyzyjnego ustawienia sensorów na palcach i zapewnienia unieruchomienia względem poszczególnych segmentów palców. Oznacza to konieczność zastosowania ciasnej rękawicy dobrze dopasowanej do ręki. W przypadku systemu wspomagania rehabilitacji, który w założeniu ma być wykorzystywany przez wielu pacjentów, może to być kłopotliwe. Dodatkowo ze względu na częste odkształcenia czujników, ich trwałość jest silnie ograniczona (na podstawie doświadczeń z wykorzystania rękawic różnych producentów podczas prowadzenia prac badawczych w Pracowni Technik Rzeczywistości Wirtualnej CIOP-PIB).

Inne spotykane w komercyjnych produktach rozwiązanie problemu rejestracji ruchu palców polega na zastosowaniu systemu optycznego. Stosowane są zarówno systemy wyposażone w aktywne bądź pasywne markery (np. www.vicon.com, www.metamotion.com),

jak i systemy bezmarkerowe (np. www.microsoft.com/en-us/kinectforwindows, www.leapmotion.com). Systemy tego typu są wygodne w użyciu, gdyż bazują na rejestracji za pomocą zestawu kamer obrazu ręki. Na podstawie analizy tego obrazu są w stanie wyznaczyć kąty w poszczególnych stawach palców. Problemem w przypadku tych systemów jest jednak dokładność pomiaru, która zależy bezpośrednio od liczby kamer, ich parametrów (takich jak rozdzielczość, kąt widzenia) oraz od odległości ręki od kamer. Jeżeli rejestrowany ma być precyzyjny ruch palców ręki poruszającej się w przestrzeni, konieczne jest zastosowanie większej liczby kamer o wyższych parametrach, co zasadniczo komplikuje całe zagadnienie i podnosi koszt. Dodatkowo pojawia się konieczność odpowiedniego rozstawienia kamer i ich kalibracji, co zasadniczo utrudnia wykorzystanie takiego systemu do wspomagania rehabilitacji.

Na potrzeby mechatronicznego systemu wspomagania rehabilitacji zdecydowano się wykorzystać inne rozwiązanie: czujniki magnetyczne wykorzystujące efekt Halla. Efekt Halla jest to zjawisko fizyczne polegające na wystąpieniu różnicy potencjałów w przewodniku, w którym płynie prąd elektryczny, gdy przewodnik znajduje się w poprzecznym do płynącego prądu polu magnetycznym. Napięcie to, zwane napięciem Halla, pojawia się między płaszczyznami ograniczającymi przewodnik, prostopadle do płaszczyzny wyznaczonej przez kierunek prądu i wektor indukcji pola magnetycznego. Jest ono spowodowane działaniem siły Lorentza na ładunki poruszające się w polu magnetycznym (za: wikipedia.pl). Pomiar tego napięcia pozwala określić wartość indukcji pola magnetycznego, która z kolei zależy od położenia i rotacji czujnika względem źródła pola. Czujniki wykorzystujące efekt Halla są niedrogie i łatwe w zastosowaniu. Charakteryzują się też niewielkimi rozmiarami i masą.

System rejestracji ruchu palców mechatronicznego systemu wspomagania rehabilitacji składał się będzie z magnesu trwałego umieszczonego centralnie na dłoni oraz zestawu czujników zamocowanych na poszczególnych członach palców. Pomiar napięcia Halla na poszczególnych czujnikach pozwoli na rejestrację ruchu palców w zakresie zgięcia i wyprostu w pełnym zakresie kątowym niezbędnym do rehabilitacji. Układ pomiarowy służący do rejestrowania napięć i wyznaczania na tej podstawie kątów w stawach oparty zostanie o mikrokontroler ATmega32 (www.atmel.com). Sygnał przesyłany będzie do komputera bezprzewodowo, poprzez interfejs Bluetooth.

4.2. Wykonywanie ruchów biernych

Ruchy bierne są to ruchy w określonych stawach pacjenta wykonywane przez terapeutę lub odpowiednie urządzenie. Ich wykonanie wiąże się z przyłożeniem siły (lub momentu siły) na segmenty kończyny. W systemach mechatronicznych realizowane jest to poprzez zestaw siłowników. Podobnie jak ma to miejsce w przypadku rejestracji ruchów, ze względu na specyfikę ruchów w poszczególnych stawach zadanie podzielić można na dwa zagadnienia: rehabilitacja kończyny górnej w zakresie od stawu ramiennego do promieniowo-nadgarstkowego (np. [8]) oraz rehabilitacja palców (np. [7]). Oba zagadnienia różnią się przede wszystkim koniecznością do uzyskania siłą. Systemy przystosowane do rehabilitacji całej kończyny są dużo większymi urządzeniami, zazwyczaj ustawionymi na podłożu. Aby zapewnić ruch całej kończyny górnej, wymagana jest od nich solidna konstrukcja i odpowiednio wysoki poziom generowanych sił. Systemy przystosowane do rehabilitacji palców są znacznie mniejsze. Bardzo często przytwierdzone są na wierzchniej stronie dłoni. Jednym z celów opisywanego projektu jest opracowanie systemu mechatronicznego należącego do tej drugiej kategorii. Jego podstawowym zadaniem będzie wykonywanie ruchów biernych palców za pomocą zestawu siłowników.

Siłownik to rodzaj silnika, w którym dostarczana energia jest zamieniana na energię mechaniczną ruchu postępowego, kąтового bądź krzywoliniowego nazywanego skokiem. Ruch kątowy w siłownikach jest rozumiany jako powtarzalny obrót, nieprzekraczający najczęściej 360° . Za względu na medium robocze, siłowniki możemy podzielić na:

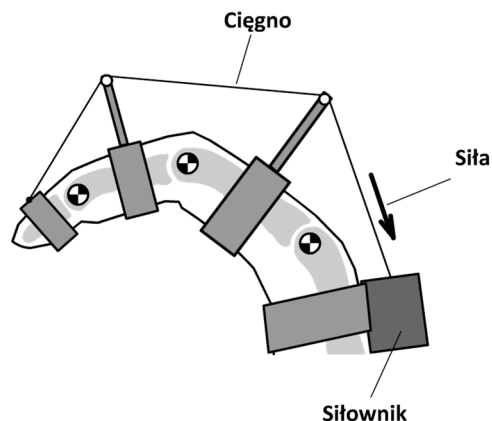
- 1) pneumatyczne,
- 2) hydrauliczne,
- 3) elektryczne.

Siłowniki z pierwszych dwóch kategorii bardzo często mają formę liniową, co jest bardzo wygodne w systemach mechatronicznych. Wymagają jednak do działania czynnika roboczego w postaci gazu (pneumatyczne) lub cieczy (hydrauliczne) wraz z instalacją wytwarzania ciśnienia. Większy problem niż w przypadku silników elektrycznych stanowi w ich przypadku precyzyjne sterowanie położeniem lub siłą. Dlatego w robotach rehabilitacyjnych najczęściej wykorzystywane są siłowniki elektryczne.

W mechatronicznym systemie wspomaganie rehabilitacji wykorzystane zostaną siłowniki typu serwomechanizm. Serwomechanizm jest to zamknięty układ sterowania ze sprzężeniem zwrotnym, w którym sygnałem wyjściowym jest jakaś dana, taka jak położenie, prędkość czy przyspieszenie. Najczęściej jest to obrót. Na rynku dostępnych jest wiele różnorodnych serwomechanizmów wykorzystywanych w modelarstwie. Mają one różne rozmiary i charakteryzują się różnym osiąganym momentem. Istnieje więc możliwość doboru urządzeń o parametrach optymalnych dla potrzeb systemu wspomaganie rehabilitacji. Serwomechanizmy zamocowane zostaną na wierzchu dłoni, połączone zostaną za pomocą dźwigni z pierścieniami nakładanymi na palce. Ich ruch za pośrednictwem dźwigni przenoszony będzie na ruch palców w zakresie zgięcia i wyprostowania. Każdy z serwomechanizmów odpowiedzialny będzie za ruch jednego palca. Pierścienie będą mogły być zakładane na paliczki dalsze lub bliższe, co umożliwi wykonywanie ruchów w różnych stawach. Do sterowania pracą serwomechanizmów opracowany zostanie układ oparty o mikrokontroler ATmega32 (www.atmel.com). Sygnał przesyłany będzie do komputera bezprzewodowo, poprzez interfejs Bluetooth.

4.3. Założenia konstrukcyjne

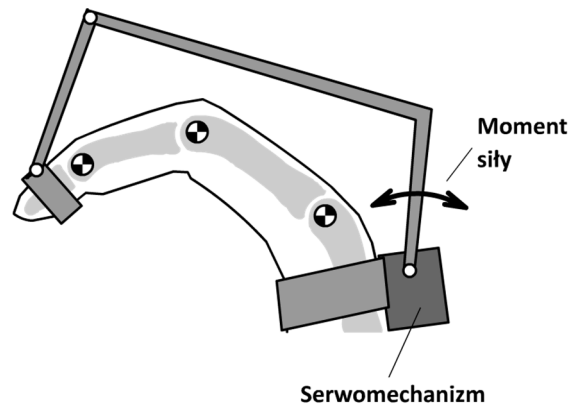
Przełożenie ruchu siłowników na ruch palców może zostać wykonane na wiele różnych sposobów [16]. W rękawicach wykorzystywanych w zastosowaniach rzeczywistości wirtualnej najczęściej realizowane jest to za pomocą cięgien (rys. 1).



Rys. 1. Konstrukcja rękawicy w oparciu o cięgna

Jeden koniec cięgna zamocowany jest do ostatniego segmentu palca, drugi do siłownika. W celu zapewnienia odpowiedniego kierunku działania siły pomiędzy tymi punktami cięgno przebiega przez przelotki zamocowane na poszczególnych segmentach palców.

Podstawową wadą mechanizmu cięgowego jest możliwość generowania siły tylko w jedną stronę, a co za tym idzie realizacja ruchów biernych jedynie w zakresie wyprostu. Z punktu widzenia wspomagania rehabilitacji niezwykle ważne jest generowanie ruchów w zakresie zarówno wyprostu, jak i zgięcia. Dlatego zdecydowano się wykorzystać układ mechaniczny bazujący na szeregowym łańcuchu kinematycznym złożonym z ciał sztywnych (rys. 2). Pierwszy człon tego łańcucha będzie obracany przez serwomechanizm, ostatni przytwierdzony zostanie do ostatniego segmentu palca.



Rys. 2. Konstrukcja rękawicy w oparciu o mechanizm szeregowy

Szczegóły konstrukcyjne dotyczące mechatronicznego systemu wspomagania rehabilitacji palców opracowane zostaną w ramach dalszych prac.

5. PODSUMOWANIE

W artykule opisano założenia mechatronicznego systemu wspomagania rehabilitacji palców wykorzystującego rzeczywistość wirtualną i gry komputerowe. Zadanie to podzielone zostało na dwa zagadnienia: rejestracja ruchu oraz wykonywanie ruchów biernych. Do rejestracji ruchu palców wykorzystane zostaną czujniki magnetyczne wykorzystujące efekt Halla. Do rejestracji ruchu w stawie promieniowo-nadgarstkowym wykorzystany zostanie czujnik inercyjny (wykorzystujący żyroskop, akcelerometr i magnetometr). Do wykonywania ruchów biernych w poszczególnych stawach palców wykorzystane zostaną serwomechanizmy modelarskie.

W ramach dalszych prac opracowany zostanie funkcjonalny model mechatronicznego systemu wspomagania rehabilitacji ręki wraz z oprogramowaniem umożliwiającym prowadzenie rehabilitacji z wykorzystaniem technik rzeczywistości wirtualnej. Następnie przeprowadzone zostaną badania z udziałem osób rehabilitowanych oraz rehabilitantów pod kątem oceny przydatności systemu.

Publikacja opracowana na podstawie wyników III etapu programu wieloletniego pn. „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy” w latach 2014-2016 dofinansowywanego w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych ze środków Ministerstwa Nauki

i Szkolnictwa Wyższego. Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.

LITERATURA

- [1] Van der Lee J.H., Snels I.A., Beckerman H., G. Lankhorst J., Wagenaar R.C., and Bouter L.M.: *Exercise therapy for arm function in stroke patients: a systematic review of randomized controlled trials*, *Clin. Rehabil.*, Vol. 15, No. 1, 2001, pp. 20-31.
- [2] Bassett S.F.: *The assessment of patient adherence to physiotherapy rehabilitation*, *N. Z. J. Physiother.*, Vol. 31, No. 2, 2003, pp. 60-66.
- [3] Engström L.O. and Öberg B.: *Patient adherence in an individualized rehabilitation programme: A clinical follow-up*, *Scand. J. Public Health*, Vol. 33, No. 1, 2005, pp. 11-18.
- [4] Maclean N., Pound P., Wolfe C., and Rudd A.: *Qualitative analysis of stroke patients' motivation for rehabilitation*, *Bmj*, Vol. 321, No. 7268, 2000, pp. 1051-1054.
- [5] Butterworth S.W.: *Influencing patient adherence to treatment guidelines*, *J Manag Care Pharm*, Vol. 14, No. 6, Suppl B, 2008, pp. 21-4.
- [6] Holden M.K.: *Virtual environments for motor rehabilitation: review*, *Cyberpsychol. Behav.*, Vol. 8, No. 3, 2005, pp. 187-211.
- [7] Merians A.S., Fluet G.G., Qiu Q., Saleh S., Lafond I. and Adamovich S.V., *Integrated arm and hand training using adaptive robotics and virtual reality simulations*, in *Proceedings of the 2010 International Conference on Disability, Virtual Reality and Associated Technology*, 2010, pp. 213-222.
- [8] Klimasara W.J., Bratek A., Pachuta M., and Pilat Z., *Systemy mechatroniczne w rehabilitacji ruchowej*, *Pomiary Autom. Robot.*, tom R. 13, nr 2/2006, 2009, s. 577-586.
- [9] Hsieh Y., Lin K., Wu C., Lien H., Chen J., Chen C., and Chang W., *Predicting Clinically Significant Changes in Motor and Functional Outcomes After Robot-Assisted Stroke Rehabilitation*, *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, Vol. 95, No. 2, pp. 316-321, Feb. 2014.
- [10] Staubli P., Nef T., Klamroth-Marganska V., and Riener R., *Effects of intensive arm training with the rehabilitation robot ARMin II in chronic stroke patients: four single-cases*, *J. NeuroEngineering Rehabil.*, Vol. 6, No. 1, 2009, p. 46.
- [11] Susman E., *Can a Robot Help in Rehabilitation for Stroke Patients?*, *Neurol. Today*, Vol. 10, No. 8, 2010, pp. 8.
- [12] Broeren J., Pareto L., Johansson B., Ljungberg C., and Rydmark M., *Stroke rehabilitation using m-Health Care and 3D virtual environments: work in progress*, in *Proceedings of the 8th International Conference on Disability, Virtual Reality and Associated Technologies*, 2010.
- [13] Budziszewski P., *A Low Cost Virtual Reality System for Rehabilitation of Upper Limb*, in *Virtual, Augmented and Mixed Reality. Systems and Applications*, Springer, 2013, pp. 32-39.
- [14] Budziszewski P., *Zastosowanie kontrolera Kinect oraz zestawu czujników inercyjnych do rejestracji ruchu człowieka dla potrzeb rzeczywistości wirtualnej oraz sterowania*, *Pomiary Autom. Robot.*, R. 16, nr 2/2012, 2012, s. 189-193.
- [15] Budziszewski P., *Wykorzystanie rzeczywistości wirtualnej do rehabilitacji kończyn górnych*, *Mechanik*, R. 84, nr 7(CD), 2011, s. 65-72.
- [16] Heo P., Gu G. M., Lee S., Rhee K., and Kim J., *Current hand exoskeleton technologies for rehabilitation and assistive engineering*, *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 13, No. 5, pp. 807-824, May 2012.