

Robotyka medyczna w Polsce

Abstract

Medical Robots in Poland - State of Art

Poland is a country with considerable intellectual resource in the field of medical robotics. Several thousand graduates every year is different specializations of robotics, automation, and bioengineering. Many academic insert in its range of scientific studies medical robotics. 10 years of Polish medical robotics was a time of high activity and scientific research, particularly in the field of robot for surgery and rehabilitation. We hope that the time is near the first clinical application and market launch. The Robin Heart surgical telemanipulator has the potential to become a European robot widely used in many branches of surgery. The original robot and mechatronic tools successfully passed the laboratory experiments and animal studies. Thanks to developed also educational and promotional program accompanied the research work Poland can now be an attractive partner for projects in the field of medical robotics. The article discusses the developments on surgical and rehabilitation robotics in Poland.

**ZBIGNIEW
NAWRAT**

Keywords:

**medical
robots,
surgical tools,
surgery,
rehabilitation**

MAŁY MANIFEST

Jesteśmy świadkami ważkiej zmiany w systemie ochrony zdrowia. Służba zdrowia (czyli powinność) przekształcona w usługę (czyli możliwość realizacji zadania po spełnieniu pewnych koniecznych warunków) zmienia się technologią zdrowia. W technologii zdrowia rola lekarza jest równie istotna jak aparatury medycznej. Coraz większe znaczenie dla oceny efektywności leczenia będzie miał dostęp do właściwych technologii i urządzeń. Zbudowaliśmy świat coraz bardziej cyfrowy. Potrafimy gromadzić, przesyłać i analizować informacje dotyczące świata i ludzi. Cyfryzacja i telemedycyna stanowi szansę na demokratyzację dostępu do usług o właściwej jakości. A po postępach technologii Tele-komunikacji czas na postępy Tele-akcji. A do

togo potrzebne są roboty medyczne. Rozwijająca się robotyka medyczna tworzy narzędzia bezpośredniego kontaktu via technologia telemedyczna z pacjentem czy personelem medycznym.

Prawdziwym problemem Polski i Unii Europejskiej jest zbyt wolne tempo przystosowywanie się do zmian zachodzących w gospodarce światowej. Poszukiwanie przyczyn sukcesów czy porażek w tej dziedzinie warto rozpocząć od analizy trzech niezbędnych czynników: jakości twórców innowacji, producentów innowacyjnych produktów i odbiorców innowacji. W takim razie proponuję – zacznijmy sami zmieniać gospodarkę, postawmy na robotykę medyczną – ważny kierunek przyszłości. Roboty medyczne stanowią o przyszłości kondycji człowieka następnego wieku.

Jestem przekonany, że rosnący potencjał polskich zespołów pracujących nad rozwojem nowej dziedziny – robotyki medycznej – stanowi niezwykłą szansę na uzyskanie właściwego miejsca w podziale rynku wysokich technologii. Przemysł robotów medycznych może być lokomotywą gospodarki, gdyż ze względu na multidyscyplinarny wysiłek twórczy wymusza rozwój wielu dziedzin zaplecza technicznego. To medycyna stanowi największe wyzwanie technologiczne, a pomoc potrzebującemu – etyczne ramy naszych działań.

Mam nadzieję, że potencjał intelektualny i rosnące doświadczenie polskich grup badawczych w zakresie robotyki medycznej odegra istotną rolę w kreowaniu tego kierunku rozwoju cywilizacji. Ten artykuł jest próbą podsumowania aktualnych prac prowadzonych w Polsce dotyczących robotyki medycznej. Na potencjalny sukces ma wpływ ogólny stan technicznego i finansowego zaplecza gospodarki, w szczególności związanego z robotyką. Zanim omówimy szansę pojawienia się robotów (według oficjalnej statystyki prowadzonej przez NFZ) w 720 szpitalach publicznych, 1099 niepublicznych, w przychodniach specjalistycznych i domach, w których przebywają potrzebujący pomocy medycznej przyglądnijmy się stanowi zrobotyzowania przemysłu w Polsce.

POLSKI RYNEK ROBOTÓW I MANIPULATORÓW

Sprzedaż robotów na świecie rośnie z roku na rok o kilka, kilkanaście procent rocznie. Rynek robotyki opisywany jest w różnych raportach, w tym „World Robotics”, który przygotowany jest co roku przez IFR Statistical Department pod egidą VDMA Robotics+Automation. Ten raport jest źródłem wielu informacji przedstawianych w artykule. Kolejnym źródłem są raporty i badania firm produkujących i sprzedających roboty.

Od prawie 50 lat określaną jest przybliżona liczba sprzedawanych co roku robotów przemysłowych. Przyjmując, że okres serwisowania i pracy jednego urządzenia wynosi od 12 do 15 lat, całkowitą liczbę działających w 2007 roku robotów oszacowano na około miliona sztuk. Jedna trzecia w Europie.

Odwołując się do wyników ankiet przeprowadzonych przez Control Engineering Polska w 2012 r., z zebranych informacji wynika [1], że najważniejszymi odbiorcami robotów/manipulatorów przemysłowych są następujące gałęzie przemysłu: motoryzacyjny, maszynowy (100% dostawców, 75% użytkowników), spożywczy (92% dostawców, 25% użytkowników), elektroniczny, komputerowy (46% dostawców, 12% użytkowników), chemiczny i farmaceutyczny (23% dostawców, 25% użytkowników). Poza tym spora część dostawców uważa, że roboty i manipulatory odgrywają dużą rolę w przemyśle: drzewnym i celulozowo-papierniczym (38%), elektrycznym (30%),

metalurgicznym (23%) i medycznym (15%). 62% użytkowników ma zainstalowane w swoich zakładach roboty i manipulatory firmy Fanuc Robotics, 50% – Gudel, 37% – ABB, 25% – Kuka Roboter, a 12% takich firm, jak: Carl Cloos Schweiss Technic, Mitsubishi oraz Kawasaki Robotics.

Z odpowiedzi uzyskanych od dostawców wynika [1], że oferowane przez nich roboty oscylują w cenach: od 101 do 200 tys. zł (84%), od 51 do 100 tys. zł (76%), powyżej 200 tys. zł (46%) oraz do 50 tys. zł (7%). Koszt zakupu robota zwraca się wg klientów w 2-4 lata (75% klientów), co najmniej 4 lata (25%). W 2011 roku 38% firm sprzedało mniej niż 10 sztuk, 37% – od 11 do 50 sztuk, a 23% – od 51 do 100 sztuk w Polsce.

Co do przyszłych, potencjalnych odbiorców robotów i manipulatorów, to za najbardziej perspektywiczne zostały uznane następujące gałęzie przemysłu: spożywczy (84% dostawców, 37% użytkowników), motoryzacyjny i maszynowy (76% dostawców i użytkowników), chemiczny i farmaceutyczny (53% dostawców i 25% użytkowników), metalurgiczny (30% dostawców, 25% użytkowników), **medyczny (23% dostawców i 25% użytkowników)** [1].

Prognozy sprzedaży na lata 2012-2014 są bardzo obiecujące. Sprzedaż robotów na świecie powinna osiągnąć poziom 140 tys. w roku 2012 i ponad 165 tys. w 2014 – mówi Piotr Zych z firmy Encon. – Sprzedaż będą napędzać rozwijające się gospodarki wschodnie, w tym Polska. W Europie Centralnej w latach 2008-2011 ilość zainstalowanych robotów przemysłowych wzrosła z 10 tys. do 17 tys. sztuk, a w roku 2014 ma wynosić ponad 28 tys. Ilość pracujących robotów w krajach rozwiniętych będzie utrzymywać się na stałym wysokim poziomie

Co do przyszłych, potencjalnych odbiorców robotów i manipulatorów, to za najbardziej perspektywiczne zostały uznane następujące gałęzie przemysłu: spożywczy (84% dostawców, 37% użytkowników), motoryzacyjny i maszynowy (76% dostawców i użytkowników), chemiczny i farmaceutyczny (53% dostawców i 25% użytkowników), metalurgiczny (30% dostawców, 25% użytkowników), **medyczny (23% dostawców i 25% użytkowników)**.

W celu oszacowania stopnia robotyzacji danego regionu stosowany jest m.in. wskaźnik gęstość robotyzacji (*robot density*) - liczba robotów przemysłowych przypadających na 10 tys. osób zatrudnionych w zakładach przemysłowych. W krajach rozwiniętych, takich jak Japonia, Korea Południowa czy Niemcy, wskaźnik ten w roku 2010 wynosił odpowiednio 306, 287 oraz 253. Dla porównania w Polsce wynosi on mniej niż 10. Niektórzy szacują jego wartość nawet na 4. Jednak dokładnych analiz takich danych w Polsce się obecnie nie prowadzi – po wyjściu Polski (z powodów ekonomicznych) z odpowiednich specjalistycznych stowarzyszeń.

Roboty przemysłowe są coraz powszechniejsze

również z powodu ceny. Ceny robotów są o ok. 50% niższe niż w latach dziewięćdziesiątych, przy jednoczesnym zwiększeniu ich funkcjonalności.

Z przedstawionych danych ujawnia się obraz, że dziś głównym odbiorcą robotów w działaniach gospodarki związanych z medycyną jest przemysł farmaceutyczny i już dziś wskazuje się na wagę (15%) tego działu przemysłu wytwarzającego roboty. Sprzęt medyczny zwykle jest wielokrotnie droższy od porównywalnego produktu stosowanego w warunkach technicznych, więc jest to również dobry kierunek biznesowy. Tym bardziej, że narzucony obecnie przez amerykańców model ekonomiczny zakłada spore koszty użytkowe odbiorcy. Decydujący się na zakup robota da Vinci muszą wziąć pod uwagę oprócz znacznych kosztów serwisowych i części wymiennych ograniczony czas jego użytkowania.

ROBOTY MEDYCZNE W POLSCE

W związku z rosnącym zapotrzebowaniem, rozbudzonymi nadziejami pacjentów i lekarzy na mniej traumatyczne metody chirurgiczne powstała potrzeba wsparcia technicznego tego typu operacji przez roboty – telemanipulatory. **Robot chirurgiczny** pokonał niektóre ograniczenia tradycyjnych narzędzi endoskopowych, lecz nie rozwiązano do tej pory wielu problemów.

Można wymienić następujące typy zrobotyzowanych systemów, które są stosowane w chirurgii [2]:

1. **Roboty toru wizyjnego** zastępujące asystenta w czasie operacji. Przy ich pomocy takich robotów jak **AESOP** (Computer Motion, USA – pierwszy robot medyczny pracujący na sali operacyjnej w Polsce, w klinice kardiologii Śląskiego Uniwersytetu Medycznego w Katowicach prowadzonej przez prof. Andrzeja Bochenka) lub **EndoAssist** (Armstrong Healthcare Ltd, High Wycombe, Wlk.Brytania) chirurg może samodzielnie sterować położeniem kamery endoskopowej. Obecnie dostępne komercyjnie: **EndoAsist** (Armstrong Healthcare), **Lapman** (Medsys).

2. **Telemanipulatory chirurgiczne**. Umożliwiają wykonywanie operacji na odległość. Typowymi przykładami są roboty **Zeus** (Computer Motion, USA – był stosowany, pożyczony na 10 operacji serca, klinika kardiologii prof. Andrzeja Bochenka) i **da Vinci** (Intuitive Surgical, USA – stosowany obecnie we Wrocławiu przez zespół prof. Wojciecha Witkiewicza). W Polsce powstała rodzina prototypowych robotów o nazwie **Robin Heart**. Obecnie, komercyjnie dostępne są jedynie telemanipulatory da Vinci.

3. **Roboty nawigacyjne (bierne)** - służą do dokładnego pozycjonowania i utrzymują prawidłowy tor narzędzia. Stosowane są głównie w procedurach neurochirurgicznych, do biopsji, np: **VectorVision** (BrainLab, Cambridge, Wlk.Brytania), **NeuroMate** (Integrated Surgical Systems, USA).

4. **Roboty nawigacyjne (czynne)** - roboty pracujące

jako narzędzia wykonawcze w systemie odwzorowania trajektorii określone podczas planowania przedoperacyjnego (nawigacyjne czynne), np. stosowane do operacji radiochirurgicznych: **CyberKnife** (Accuray Inc, USA; obecnie dostępny również w Polsce - Centrum Onkologii w Gliwicach), **Centre Protithérapie** (Orsey); neurochirurgicznych: **Roboscope** (Imperial College, Londyn) oraz operacji ortopedycznych: **Robodoc** (Integrated Surgical Systems, USA) - roboty do radioterapii.

5. **Roboty biochirurgiczne**. Powstają roboty do manipulacji komórkowej.

W Polsce prace w zakresie robotyki chirurgicznej zostały zapoczątkowane przez zespół autora w 2000 r. Wtedy został przyznany pierwszy grant badawczy, którego celem było wykonanie robota chirurgicznego (Religa – Nawrat w Zabrzu), a także zaczęto zbierać pierwsze doświadczenia kliniczne związane z zastosowaniem robota **AESOP** (Bochenek – Cisowski w Katowicach).

Tabela 1. Wybrane roboty w historii polskiej medycyny

Telemanipulatory chirurgiczne



1. Amerykański robot stosowany w Polsce

Da Vinci: Jedyń obecnie stosowany klinicznie telemanipulator chirurgiczny w szerokim zakresie (cholecystektomia, splenektomia, resekcja wreczka żółciowego, operacje prostaty, operacje kardiologiczne i ginekologiczne). Ponad tysiąc robotów sprzedanych robotów. Montaż: na niezależnej podstawie. Stałopunktowość (w miejscu przecięcia powłok ciała pacjenta) osiągnięta kinematycznie. Liczba stopni swobody: 7. Bierne stopnie swobody mają kinematykę typu SCARA. Zastosowano mechanizm równoległowodowy do odsunięcia osi obrotu poza obręb mechanizmu. - Firmy Intuitive Surgical oparta o doświadczenia Uniwersytetu Stanforda powstała w 1995 r. W 1997r. telemanipulator Da Vinci został dopuszczony do operacji kardiologicznych.

Firma: Intuitive Surgical Ltd. USA (Sunnyvale, CA), www.intuitivesurgical.com

2. **Zeus:** Telemanipulator. Robot produkowany w założonej w 1989 r. firmie Computer Motion (opartej na doświadczeniach NASA). Dopuszczony do użytku klinicznego przez FDA w 1996 r. W 1999 r. wykonano za jego pomocą pierwszą na świecie operację pomostowania naczyń wieńcowych na bijącym sercu z wykorzystaniem robota. W 2003 w wyniku przegranej wojny patentowej Computer Motion połączyła się z Intuitive Surgical. Wykorzystano go w wielu pionierskich operacjach, w tym podczas projektu Lindbergh (w 2001r.) – teleoperacja transatlantycka New York- Strasburg. Robot o trzech ramionach, jedno z ramion jest endoskopem sterowanym głosem (AESOP). Pozostałe dwa, wyposażone w narzędzia chirurgiczne, kontrolowane są przez konsolę chirurga. Montaż: każde ramię niezależnie mocowane do stołu operacyjnego. Stałopunktowość (w miejscu przecięcia powłok ciała pacjenta) osiągnięta kinematycznie. Liczba stopni swobody: 6. Każde ramię posiada trzy czynne stopnie swobody o kinematyce typu SCARA z przegubem biernym na końcu. Narzędzia o trzech stopniach swobody.

Firma: Marka obecnie należy do IS. Intuitive Surgical Ltd. USA (Sunnyvale, CA)
www.intuitivesurgical.com
 Wycofany z rynku.

3. **Robin Heart:** Rodzina polskich robotów chirurgicznych do operacji na tkankach miękkich np. sercu. Telemanipulator. Oryginalna konsola Robin Heart Shell. Liczba stopni swobody: 6-7. Montaż: na niezależnej podstawie. Faza eksperymentów na zwierzętach i przygotowania technologii produkcji seryjnej. Stałopunktowość (w miejscu przecięcia powłok ciała pacjenta) osiągnięta kinematycznie. Struktura sferyczna ze zdwojonym układem równoległowodów przenoszącym oś obrotu drugiego stopnia swobody w położenie poza mechanizmem. Narzędzie w pierwszej wersji robota posiada 5 stopni swobody: obrót wokół osi narzędzia, 2 obroty wokół osi prostopadłych do osi narzędzia i niezależny ruch obydwu szczęk narzędzia.

Firma: Fundacja Rozwoju Kardiochirurgii w Zabrzu
www.robinheart.pl



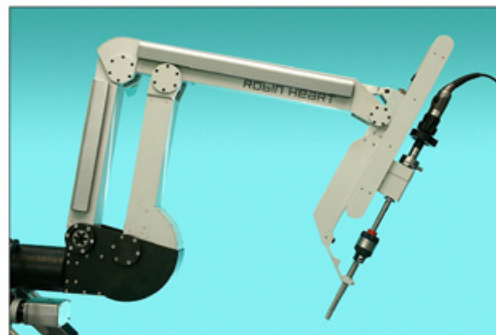
Manipulatory endoskopowego toru wizyjnego

1. **AESOP:** Automated Endoscopic System for Optimal Positioning to manipulator kamery endoskopowej sterowany głosem (również wersje wykorzystujące dłoń lub stopę). Montaż: mocowany do stołu operacyjnego. Liczba stopni swobody: 5. Bardzo popularny (ponad 100 tys. aplikacji klinicznych: zabiegi laparoskopowe i endoskopowe, zabiegi chirurgii sercowo-naczyniowej, urologia ogólna i ginekologia, cholecystektomie, hernioplastyki, fundoplikacje Nissena, adrenalektomie, kolektomie). Ramię AESOP posiada trzy czynne stopnie swobody o kinematyce typu SCARA z przegubem biernym na końcu.

Firma: Wyprodukowany przez Computer Motion obecnie Intuitive Surgical. Intuitive Surgical Ltd. USA (Sunnyvale, CA)
www.intuitivesurgical.com
 Wycofany z rynku.

2. **Robin Heart Vision:** Telemanipulator sterowany za pomocą minidżojstika lub pilota. Testowano również sterowanie ruchem głowy (MEMS żyroskopy) i głosem. Liczba stopni swobody: 5. Montaż: mocowany do stołu operacyjnego. Przeszedł pozytywnie próby w czasie eksperymentów na zwierzętach. Jest przygotowywany jako pierwszy do wdrożenia klinicznego.

Firma: Fundacja Rozwoju Kardiochirurgii w Zabrzu
www.robinheart.pl



Roboty rehabilitacyjne

1. Robot rehabilitacyjny, prototyp RENUŠ -1. Z punktu widzenia kinematyki struktura mechaniczna urządzenia stanowi mechanizm o trzech stopniach swobody, umożliwiający ruch końca ramienia względem trzech osi bazowego układu współrzędnych prostokątnych. Na końcu ramienia

znajduje się interfejs mechaniczny manipulatora wyposażony w czujnik sił i momentów. Zapewnia on sprzężenie między pacjentem a układem sterowania, który może odczytywać kierunek, w którym pacjent próbuje poruszać uchwyt [25].

Firma: Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów w Warszawie PIAP; www.piap.pl

2. Robot ARM-100.

Sesja treningowa wykorzystująca robota ARM-100 składa się z dwóch etapów. Pierwszy etap polega na „uczeniu” robota ruchu rehabilitacyjnego. W tym etapie, po przymocowaniu pacjenta do ramienia robota, rehabilitant wykonuje ruch rehabilitacyjny prowadząc rękę pacjenta. Robot na podstawie sygnałów z czujników sił, mierzących naciski wywierane przez rękę pacjenta na elementy ramienia robota, przemieszcza odpowiednie elementy ramienia i jednocześnie zapamiętuje w systemie komputerowym kolejne położenia elementów swojego ramienia. W następnym etapie sesji treningowej robot odtwarza zapamiętany ruch wzorcowy z wymaganą szybkością i ilością powtórzeń, badając jednocześnie czy nie są przekraczane dopuszczalne siły działające na pacjenta.

Firma: Instytut Techniki i Aparatury Medycznej w Zabrze
www.itam.zabrze.pl

Współpraca z utworzonym zespołem L. Podsekowskiego z Politechniki Łódzkiej oraz K. Mianowskim z Politechniki Warszawskiej zaowocowała konkretnymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi robota Robin Heart oraz rozpowszechnieniem tej nowej dziedziny naukowej w obszarze akademickim. Obecnie kilkanaście uczelni w Polsce informuje o działalności naukowej i dydaktycznej w zakresie robotyki medycznej. Tabela 2 stanowi próbę ukazania postępów polskiego zespołu na tle wydarzeń na świecie.

Pod koniec 2010 pierwszy robot da Vinci we Wrocławiu. Wersja z dwoma konsolami da Vinci S pozwala na prowadzenie pełnego zakresu aktywności chirurgicznej i edukacyjnej. Przy asyście robota chirurdzy z Wojewódzkiego Szpitala Specjalistycznego we Wrocławiu pod kierunkiem prof. Witkiewicza wykonali około 100 operacji z zakresu ginekologii, urologii oraz chirurgii naczyniowej.



Tabela 2 Kamienie milowe polskiego projektu na tle historii robotyki medycznej [3].

DATA	WYDARZENIE
1921	Czeski pisarz Karel Capek po raz pierwszy używa słowa "robot" w swojej sztuce "R.U.R" (Rossum's Universal Robots). Robot to jedno niewielu słów słowiańskiego pochodzenia, które weszło do współczesnego słownika technicznego.
1938	Issac Assimov umieszcza termin robotyka w swojej noweli science-fiction i formułuje Trzy Prawa Robotyki.
1947	Opracowanie pierwszego teleoperatora z serwonapędem elektrycznym.
1948	Opracowanie teleoperatora ze sprzężeniem zwrotnym od siły.
1954	Zaprojektowanie pierwszego programowalnego robota przez Georg'a Devola.
1956	Zakupienie praw do robota Devola i założenie firmy Unimation przez Josepha Engelbergera, studenta fizyki na Uniwersytecie Columbia.
1958	Pierwszy prototyp robota Unimate zainstalowany w fabryce General Motors.
1961	Pierwszy seryjny robot Unimate zainstalowany w fabryce General Motors w Trenton w stanie New Jersey.
1966	Automatyczny lądowik księżycowy "Surveyor" ląduje na księżycu. K. Semm przeprowadza pierwszą operację laparoskopową (ginekologia).
1969	W Unimate General Motors rozpoczęto montaż nadwozi Chevrolet'a Vega przy pomocy robotów Unimate.

1970	Pierwsze sympozjum dotyczące robotyki w Chicago.
1970	W listopadzie na powierzchni Księżycy został wysłany przez Związek Radziecki pierwszy bezzałogowy, sterowany z Ziemi pojazd – Łunochod 1. W ciągu 322 dni przejechał 10 km, przekazał na Ziemię 20 tys. zdjęć oraz dane o właściwościach gruntu. O sile radzieckiej grupy konstruktorów niech świadczy, że w ciągu dwóch tygodni zbudowali dwa lekkie samochody na ratunek dla Czarnobyla po katastrofie elektrowni jądrowej.
1970	General Motors staje się pierwszą firmą wykorzystującą systemy wizyjne w zastosowaniach przemysłowych. System Consight zostaje zainstalowany w zakładzie w St. Catharines, Ontario, Kanada.
1971	Założenie Japońskiego Stowarzyszenia Robotyki Przemysłowej (Japanese Industrial Robot Association). Opracowanie robota Stanford Arm na Uniwersytecie Stanford.
1972	Kawasaki instaluje zrobotyzowaną linię produkcyjną w zakładach Nissan, roboty zostały dostarczone przez firmę Unimation.
1973	Opracowanie pierwszego języka programowania robotów (WAVE) na Uniwersytecie Stanford. Pierwszy numer międzynarodowego czasopisma "Roboty Przemysłowe".
1974	Wprowadzenie przez firmę Cincinnati Milacron robota ze sterowaniem komputerowym.
1974	Hitachi prezentuje robota Hi-T-Hand używającego czujników dotykowych i siłowych pozwalających na wkładanie sworzni do otworów.
1978	Wprowadzenie przez firmę Unimation robota PUMA (Programmable Universal Assembly), opracowanego na podstawie projektu powstałego w trakcie badań w fabryce General Motors.
1979	Wyposażony w kamerę i komputer (przetwarzając milion operacji na sekundę) robot mobilny Stanford Cart jako pierwszy samodzielnie się porusza unikając przeszkód.
1979	Wprowadzenie robotów SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) w Japonii.
1984	Joseph Engelberger zakłada firmę Transition Robotics (później znana jako Helpmates), która zajmuje się rozwojem i budową robotów usługowych.
1984	Zostaje opracowany PROWLER, pierwszy z serii robotów militarnych.
1985	Pierwsza operacja chirurgiczna przy użyciu robota chirurgicznego (robot przemysłowy PUMA 200 wyposażony w laser chirurgiczny) wykonana przez zespół kierowany przez Kwoch'a w Memorial Hospital of Los Angeles. Po serii operacji na 22 pacjentach eksperyment został przerwany, a robot uznany jako nie spełniający wymagań medycznych.
1986	Rozpoczęcie prac nad robotem humanoidalnym przez firmę HONDA.
1988	Pierwszy robot (robo-pielęgniarka HelpMate) pojawia się w szpitalu (Danbury Hospital w Connecticut).
1989	Zmodyfikowany robot przemysłowy o nazwie NeuroMate – Stereotactic Assistant System (ISS Inc.) został użyty w procedurze neurochirurgicznej – zespół Lavalley, Benabid. Wykonano nim, między innymi, ponad tysiąc biopsji guza mózgu.
1989	Powstaje firma Computer Motion – przyszły producent robota Zeus i AESOP
1991	Przezcewkowa resekcja gruczołu krokowego (TURP) przy wykorzystaniu robota Puma 560.
1992	John Adler demonstruje koncepcje robota CyberKnife, do radioterapii.
1992	Powstaje firma Integrated Surgical Systems producent robota ROBODOC. Konstrukcja robota ROBODOC była oparta na robocie firmy IBM typu Scara. Został on użyty do przeprowadzenia 10 operacji aloplastyki stawu biodrowego. Robot współpracuje z systemem planowania operacyjnego Orthodoc.
1993	Pierwszy robot medyczny uzyskuje akceptację FDA w chirurgii – AESOP 100 firmy Computer Motion, który służy do kierowania torem wizyjnym.
1993	Zrobotyzowany system do precyzyjnego umiejscowienia igły dla potrzeb stereo-taktycznej biopsji mózgu Minevra został użyty dwukrotnie w 1993 roku w CHUV Hospital w Szwajcarii. Robot współpracuje ściśle ze skanerem wykonującym tomografię komputerową.
1994	Firma wprowadziła Computer Motion Inc. Z Kaliforni na rynek pierwszy system zdalnego pozycjonowania endoskopu – AESOP - z ang. Auto Endoscope System for Optimal Positioning AESOP. Jest to pierwszy robot, który uzyskał pozwolenie FDA do wprowadzenia na rynek medyczny.
1995	Frederic Moll, Robert Younge i John Freund organizują firmę Intuitive Surgical w oparciu o osiągnięcia SRI International (dawniej znany jako Stanford Research Institute).

1997	Pierwsza operacja robotem - Cadere i Himpens w Brukseli zastosowali prototyp robota da Vinci (Intuitive Surgical, Sunnyvale, CA) do operacji resekcji pęcherzyka żółciowego.
1998	Robot mobilny Sojourner ląduje na Marsie 4 lipca.
1998	Skonstruowanie pierwszego bionicznego ramienia. Wykorzystuje go Szkot - Campbell Baird.
1998	W Paryżu (Carpentier) przeprowadzono pierwszą, przy użyciu robota chirurgicznego w pełni endoskopowi operację pomostowania aortalno-wieńcowego przy użyciu robota da Vinci (Computer Motion Inc).
1998	Frank Diamiano przeprowadził pierwszą procedurę ginekologiczną w Stanach Zjednoczonych przy użyciu systemu Zeus.
1999	Douglas Boyd z London Health Sciences Centre's (LHSC) wykonał pierwszy na świecie zabieg pomostowania naczyń wieńcowych na bijącym sercu przy zamkniętej klatce piersiowej – stosując robota Zeus. Następnie wykonał pierwszy hybrydowy zabieg rewaskularyzacji serca robotem.
1999	Ralph Damiano, w Milton S. Hershey Medical Center w Penn State College of Medicine w Hershey wykonał pierwszą operację pomostowania naczyń wieńcowych ze wspomaganie robota Zeus w Stanach Zjednoczonych.
2000	da Vinci zostaje pierwszym robotem, który otrzymał akceptację FDA dla prowadzenia operacji laparoskopowych w USA.
2000	Po długiej wojnie patentowej następuje porozumienie firmy Computer Motion i Intuitive Surgical, którego konsekwencją jest wycofanie z rynku robotów Zeus i AESOP.
2000	Francois Laborde z L'Institut Mutualiste Montsouris Chiosy wykonywał po raz pierwszy zabieg kardiologii dziecięcej (PDA) z wykorzystaniem komputera Zeus.
2000	Z inicjatywy Z. Nawrata rozpoczęcie projektu Robin Heart przez Fundację Rozwoju Kardiologii w Zabrze. Kierowania pierwszym projektem sfinansowanym przez Komitet Badań Naukowych podjął się znakomity kardiolog, entuzjasta innowacyjnych technologii medycznych, prof. Zbigniew Religa.
2001	CyberKnife otrzymał akceptację FDA jako pierwszy na świecie robot do radioterapii.
2001	Robot Zeus otrzymał akceptację FDA dla prowadzenia operacji laparoskopowych w USA.
2001	Dokonano transkontynentalnej (7 tys. km) operacji wycięcia pęcherzyka żółciowego przy pomocy robota Zeus (Intuitive Surgical Inc) - Operacja Lindbergh. Chirurg Marescaux, przebywający w Nowym Jorku, zoperował pacjenta leżącego na sali operacyjnej w Strasburgu.
2002	Pierwsza w Polsce konferencja specjalistyczna poświęcona robotom medycznym Roboty Chirurgiczne. Zademonstrowano na niej pierwsze polski modele robotów – w tym Robin Heart 0. Konferencja zmieniła następnie nazwę na Roboty Medyczne, zwyczajowo odbywa się w grudniu w Fundacji Rozwoju Kardiologii w Zabrze.
2003	Przeprowadzono pierwszą teleoperację szpital-szpital. M. Anvari z Kanady przeprowadził operację, fundoplikację (Nissan) na odległości 350 km (pomiędzy McMaster University w Hamilton, Ontario Canada a North Bay) robotem Zeus.
2004	3 astronautów zanurzonych w laboratorium 19 m pod powierzchnią wody u wybrzeży Key Largo (Floryda) udowodniło, że można przeprowadzić (na sztucznym modelu pacjenta) operację laparoskopową cholecysektomii w ramach projektu NEEMO 7 (NASA Extreme Environment Mission Operation). Operację robotem Zeus prowadził M. Anvari.
2005	Tactile Technologies, z Rehovot w Izraelu naukowcy zbudowali robota dentystę - to pierwszy krok do zautomatyzowania procedur dentystycznych.
2008	Wydanie pierwszej książki Roboty Medyczne w Polsce (red. Nawrat).
2009	Pierwsze eksperymenty Robina na zwierzętach (pęcherzyk żółciowy i elementy operacji zastawek serca) Centrum Medycyny Doświadczalnej SUM.
2010	Testy na zwierzętach nowego robota Robin Heart mc2 (pobranie tętnicy piersiowej i elementy operacji bypas).
2010	Założenie Międzynarodowego Stowarzyszenia na rzecz Robotyki Medycznej w Zabrze (International Society for Medical Robotics) – w czasie corocznej konferencji Roboty Medyczne/Medical Robots.
2010	Pierwsze próby teleoperacji Zabrze FRK-Katowice Centrum Medycyny Doświadczalnej SUM robotem Robin Heart (przeprowadzone z sukcesem).

Ważnym działem aplikacyjnym robotów jest rehabilitacja. Rehabilitacja ruchowa polega na wielokrotnym powtarzaniu pojedynczych lub zestawów ruchów.

W Polsce powstało w ostatnich latach kilka prototypowych konstrukcji robotów rehabilitacyjnych. Aktywność w tym zakresie prezentują głównie Instytut Techniki i Aparatury Medycznej, w Zabrze i Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów w Warszawie PIAP.

Od lat 60-tych trwają prace nad egzozkietelowymi konstrukcjami pozwalającymi na aktywne uczestnictwo w życiu osób z niedowładem kończyn. Pionierskie prace w tym zakresie prowadzono między innymi na Politechnice Warszawskiej. Niektórzy bioinżynierzy sztucznych narządów wliczają w szeregi robotyki medycznej. Szczególnie uzasadnione jest o w obszarze ortopedii – pionierskie prace w Polsce w tym zakresie prowadzone były na Politechnice Warszawskiej, a obecnie wiodąca jest Politechnika Wroclawska (sztuczna ręka powstająca w zespole prof. R. Będzińskiego). Tamże prowadzone są (pod kierunkiem K. Tchonja) bardzo ciekawe prace nad robotami socjalnymi.

Krajowa konferencja robotyki w 2012 r. była okazją do podsumowania obecnego stanu polskiej robotyki medycznej na sesji organizowanej przez prof. Grzegorza Granosika oraz autora tej publikacji.

POSTĘPY PRAC BADAWCZYCH I KONSTRUKCYJNYCH W ZAKRESIE ROBOTÓW MEDYCZNYCH W POLSCE

Poniżej jest przedstawiony przegląd najnowszych prac dot. Robotyki medycznej opublikowanych w: Postępy robotyki, tom 1. Pod red. Krzysztofa Tchonja i Cezarego Zielińskiego. Oficyna wydawnicza politechniki warszawskiej, Warszawa 2012.

W pracy [4] L. Podsędkowski przedstawił kolejne postępy dotyczące opracowywanego robota Robin Heart 3. Kierunek obecnie prowadzonych prac dotyczy rozwoju narzędzi (stosowanie wymiennych końcówek narzędziowych oraz wprowadzenie wzmocnienia siły działającej w szczękach), automatycznej wymiany narzędzi (został zaprojektowany automatyczny magazyn narzędzi) oraz rozwoju systemu sterowania robota (intuicyjny zadajnik ruchu z sprzężeniem siłowym).

Autor przedstawił pracę [5] dotyczącą przygotowania robotów Robin Heart i zespołu do pierwszych zastosowań klinicznych. Jeden z testowanych 2009-2010 r. robotów w pełni spełnił oczekiwania odbiorców. Robot Robin Heart Vision został przeznaczony do prób klinicznych. Jednak po uzyskaniu grantu na nowego, lekkiego, walizkowego robota nazwanego Robin Heart PortVisionAble zatrzymano ten program i zdecydowano uruchomić program wdrożeniowy za rok już dla nowego opracowywanego robota. Mani-



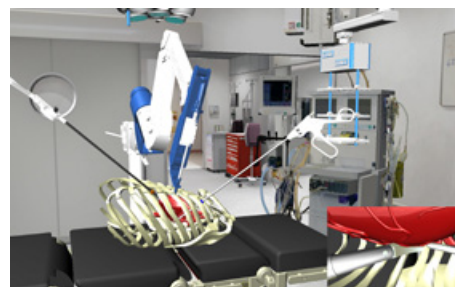
Robin Heart Vision – robot toru wizyjnego do operacji małoinwazyjnych.

Opracowany w 2007 roku na podstawie projektu Robin Heart 1 telemanipulator, przeznaczony jest do pozycjonowania endoskopu w trakcie zabiegów chirurgicznych (możliwość zamocowania endoskopów wielu producentów), posiada następujące parametry:

Zakres ruchu	DOF1 [stopnie]	DOF2 [stopnie]	DOF3 [mm]
Wartość założona	150	120	150
Wartość osiągnięta	187	117,5	Zasięg efektywny: 165 Całkowity przesuw: 400

Powtarzalność pozycjonowania nie gorsza niż 0,03 mm. Dokładność pozycjonowania nie gorsza niż 0,1 mm.

Model operacji na sercu z robotem Robin Heart Vision – wirtualna sala operacyjna. Sala została wyposażona we wszystkie projektowane roboty, narzędzia mechatroniczne oraz wybrane typowe narzędzia chirurgiczne i elementy sali operacyjnej. Technologia wirtualnej rzeczywistości może doskonale służyć jako interaktywne narzędzie szkoleniowe.



pulator Robin Heart Vision umożliwia pokazanie pola operacyjnego podczas zabiegów endoskopowych, a manipulator Robin Heart umożliwia samo wykonanie operacji.

Grupę młodych inżynierów prowadzoną przez K. Mianowskiego z PW reprezentował T. Barczak, prezentując projekt mechanizmu sferycznego o 3 stopniach swobody do zastosowania w robocie-telemanipulatorze zadajaco-wykonawczym ze sprzężeniem zwrotnym od siły przeznaczonym do prowadzenia operacji chirurgicznych. Strukturę kinematyczną manipulatora stanowi mechanizm sferyczny typu 5R. Proponowane rozwiązanie jest sferycznym manipulatorem równoległym [6].

Grupa prowadzona przez J. Cieślaka (AGH) i R. Leniowskiego (Politechnika Rzeszowska) zaprezentowała kilka prac dotyczących opracowania redundantnego zrobotyzowanego narzędzia laparoskopowego o kilku stopniach swobody wyposażonego we własne napędy - miniaturowe silniki prądu stałego – od planowania trajektorii pracy robota [7], przez system sterowania [8] do modeli stanowisk treningowych [9]. Robot składa się z 6 członów, o średnicy ok. 10 mm, napędzanych miniaturowymi silnikami elektrycznymi BLDC poprzez zespół przekładni planetarnych i ślimakowych, o łącznym przełożeniu powyżej 1/10000. Całą konstrukcję robota pokrywa powłoka antyseptyczna [8].

W. Klimasara i Z. Pilat twórcy robota RENUŠ omówili rozwój systemów mechatronicznych wspomagających rehabilitację ruchową człowieka. „W Polsce prace badawcze w dziedzinie zaawansowanych maszyn i urządzeń wspomagających rehabilitację pacjentów prowadzono od początku lat 60., m.in. na Politechnice Warszawskiej i Politechnice Wrocławskiej. Pierwsze prototypy zrobotyzowanych urządzeń rehabilitacyjnych opracowano w ramach Programu Wieloletniego PW-004, koordynowanego przez Instytut Technologii Eksploatacji PIB w Radomiu. W programie tym Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP w latach 2006-2009 zrealizował dwa zadania badawcze, których celem było opracowanie modeli mechatronicznych systemów wspomagania rehabilitacji kończyn pacjentów, zwłaszcza po udarach mózgu. Powstały dwa urządzenia: system RENUŠ-1, przeznaczony do wspomagania rehabilitacji kończyn górnych oraz system RENUŠ-2 przeznaczony do wspomagania rehabilitacji kończyn dolnych [11].

A. Michnik dokonał przeglądu [12] prototypowych robotów rehabilitacyjnych z zaobrazskiego ITAMU. Pierwszym robotem, który powstał w Instytucie Techniki i Aparatury Medycznej, był robot do rehabilitacji kończyn górnych ARM-100 (7 stopni swobody). Drugim robotem rehabilitacyjnym jest robot LEG-100 posiadający 5 osi swobody.

Kolejna praca z Politechniki Łódzkiej dotyczyła robotów rehabilitacyjnych. A. Gmerek przedstawił robota ARR (Arm Rehabilitation Robot) przeznaczo-

nego do rehabilitacji kończyn górnych [13]. Aktywna część robota ma postać egzoskieletu, w który mocuje się kończynę górną rehabilitowanego pacjenta. Z robotem współpracuje system bioelektrycznego sprzężenia zwrotnego oparty o sygnały EMG (miopotencjały). Na podstawie tych sygnałów estymowana jest m.in. siła generowana przez pacjenta

Kolejny ośrodek od wielu lat zajmujący się robotyką medyczną, Politechnikę Poznańską reprezentował P. Kaczmarek prezentując nowe rozwiązania w zakresie konstrukcji egzoskieletu kończyn dolnych przedstawił [14]. Zaprezentowano konstrukcję prototypu egzoskieletu kończyn dolnych wyposażonego w 4 napędy (w stawach biodrowych i kolanowych) oraz 4 przeguby pasywne (w stawach skokowych i w biodrowych dla ruchu odwodzenia). Konstrukcja egzoskieletu została zaprojektowana w celu wspomaganie funkcji lokomocyjnych oraz rehabilitacji ruchowej w obrębie kończyn dolnych.



Z Politechniki Poznańskiej M. Kordasz zaprezentowała pracę [15] dotyczącą sterowania manipulatora rehabilitacyjnego zaś Krystian Klimowski przedstawił pracę dotyczącą analizy ruchu z wykorzystaniem czujników akcelerometrycznych [16].

Kolejna praca w obszarze robotów rehabilitacyjnych została przedstawiona przez K. Mianowskiego (PW) – wstępny projekt manipulatora do rehabilitacji kończyny górnej człowieka [17].

Pracę z najbardziej doświadczonego w Polsce zespołu pracującego nad sztuczną ręką z Politechniki Wrocławskiej przedstawił T. Suchodolski [16]. Praca

omawia problem sterowania (miosygnalami) decyzyjnego bioprotezę dłoni traktowany jako rozpoznawanie intencji ruchowych człowieka na drodze analizy sygnałów bioelektrycznych z kikutu protezowanej kończyny [18].

PODSUMOWANIE

Z dumą obserwuję dynamiczny rozwój myśli technicznej, prac naukowych, badawczych związanych z robotyką medyczną. Od 2002 roku organizujemy konferencje Roboty medyczne w Zabrze, które były zawsze polem ożywionej dyskusji konstruktorów i potencjalnych przyszłych użytkowników. Zawsze tym spotkaniom towarzyszą pokazy nowych robotów i rozwiązań technicznych.

W Polsce wydaliśmy dwie pozycje książkowe poświęcone wyłącznie robotyce medycznej: *Roboty medyczne* red Zbigniew Nawrat, 2007, M Studio, Zabrze (dostępne w .pdf na stronie www.robinheart.pl) oraz *Roboty Medyczne Budowa i zastosowanie*, WNT, Warszawa 2010, Leszek Podśędkowski. Dwukrotnie w tym czasie w postęпах robotyki wydawanych w zawiązku z Krajowymi Konferencjami Robotyki przez prof. Krzysztofa Tchonina wyszczególniono specjalne rozdziały poświęcone tej nowej dziedzinie robotyki.

Przedstawiony przegląd stanu polskiej robotyki medycznej jest w moim przekonaniu dowodem dobrej pozycji naukowej i innowacyjności polskich zespołów badawczych. Może stanowić podstawę budowania naszej silnej pozycji w Europie. Stać nas na polski przemysł robotów medycznych.

Literatura:

[1] www.controlengineering.pl/menu-gorne/artukul/article/polski-rynek-robotow-i-manipulatorow; 19 kwiecień 2012, Autor: Agata Grabowska, Control Engineering Polska.

[2] Nawrat Z.: *Roboty i manipulatory w medycynie. Mechanika Techniczna*. Tom 12. *Biomechanika*. Red. R. Będziński. Warszawa: IPPT PAN 2011, 753–827.

[3] Zbigniew Nawrat. *Robot chirurgiczny Robin Heart – projekty, prototypy, badania, perspektywy*. Śląski Uniwersytet Medyczny w Katowicach. Katowice 2011.

Poniżej prace w: *Postępy robotyki Tom 1*. Pod red. Krzysztofa Tchonina i Cezarego Zielińskiego. Oficyna wydawnicza politechniki warszawskiej, Warszawa 2012.

[4] *System narzędziowy i wybrane aspekty sterowania robota Robin Heart*, Leszek Podśędkowski, Piotr Wróblewski, Piotr Zawiasa, str. 15-25.

[5] *Robin Heart – przygotowanie robotów i zespołu eksperymentalnego do pierwszych zastosowań klinicznych*, Zbigniew Nawrat, Paweł Kostka, Kamil Rohr, Wojciech Sadowski, Str 5-15.

[6] *Projekt zadajnika i manipulatora sferycznego przeznaczonego do chirurgii laparoskopowej*. Tomasz Barczak, Krzysztof Mianowski, s. 25-35.

[7] *Model kinematyczny redundantnego narzędzia laparoskopowego oraz wybrane zagadnienia planowania jego trajektorii*. Adam Jan Zwierzyński, Jacek Cieślak, s. 129-139.

[8] *Sterowanie mikrosiłników o bardzo wysokich prędkościach obrotowych sprzężonych z wielostopniowymi przekładniami planetarnymi*. Ryszard Leniowski, Lucyna Leniowska, s. 161-175.

[9] *Modelowanie narządów wewnętrznych człowieka za pomocą wielościanów na potrzeby systemu treningowego dla robota chirurgicznego ROCH-1*. Ryszard Leniowski, Marcin Zima, Szymon Jurkowski, s. 115-129.

[10] *Opis geometrii ciała dla celów planowania trajektorii redundantnych narzędzi Laparoskopowych*. Adam Jan Zwierzyński, Jacek Cieślak, s. 139-149.

[11] *Rozwój systemów mechatronicznych wspomagających rehabilitację ruchową człowieka*. Wojciech J. Klimasara, Zbigniew Pilat, s. 35-51.

[12] *Prototypy robotów rehabilitacyjnych opracowane przez ITAM Zabrze*. A. Michnik, M. Bachorz, J. Brandt, Z. Paszcenda, R. Michnik, J. Jurkojć, W. Rycerski, J. Janota, s. 51-61.

[13] *ARR – Robot do Rehabilitacji kończyny górnej*. Artur Gmerek, s. 61-71.

[14] *Konstrukcja egzoskieletu kończyn dolnych do rehabilitacji i wspomaganie lokomocji*. Piotr Kaczmarek, Rafał Kabaciński, Mateusz Kowalski, s. 71-81.

[15] *Zastosowanie odpornego sterowania siłowego w manipulatorze rehabilitacyjnym*, Marta Kordasz, Rafał Madoński, Piotr Sauer, Krzysztof Kozłowski, s. 91-103.

[16] *Wykorzystanie czujnika akcelerometrycznego do pomiaru kąta zgięcia w stawie kolanowym*. Krystian Klimowski, Piotr Sauer, s. 149-161.

[17] *Projekt manipulatora do rehabilitacji kończyny górnej człowieka*. Krzysztof Mianowski, Michał Pierzchanowski, s. 81-91.

[18] *Sterowanie bioprotezą dłoni – Klasyfikacja miosygnali za pomocą drzew decyzyjnych*. Tomasz Suchodolski, Andrzej Wołczowski, s. 103-115.

