

Krzysztof Mianowski  
Dr inż. Adiunkt  
ITLiMS Politechnika Warszawska  
- Karol Kałuski,  
- Marcin Witkowski  
studenci Wydziału MEiL,  
Politechnika Warszawska  
kierunek automatyka i robotyka

## STANOWISKO DO BADANIA MANIPULATORÓW MEDYCZNYCH

*W pracy przedstawiono stan prac nad stanowiskiem do badania manipulatorów medycznych, które jest budowane w Zakładzie Teorii Maszyn i Robotów w Instytucie Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej Politechniki Warszawskiej. Zaprezentowano podstawowe założenia projektu, ogólną koncepcję stanowiska, wyniki rozważań teoretycznych i wstępnych badań doświadczalnych dotyczących własności kinematycznych manipulatorów medycznych stosowanych w laparoskopii. Koncepcja stanowiska do badania manipulatorów medycznych powstała jako przedsięwzięcie własne w związku z opracowanym przez Fundację Rozwoju Kardiochirurgii w Zabrze, w ramach projektu badawczego KBN, robotem kardiochirurgicznym Robin Heart.*

### THE STAND FOR EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF MEDICAL MANIPULATORS

*Abstract: Actual state of the stand for investigations of medical manipulators constructed and build at the Department of the Theory of Machines and Mechanisms at the Institute of Aeronautics and Applied Mechanics of Warsaw University of Technology is presented in the paper. The paper contains: the basic assumptions of the project, the main concept of the stand, some results of teoretical investigations concerned with the problem, and initial experimental results of kinematic properties of selected medical manipulators applied in laparoscopy. The concept of the stand is concerned with the project of the first polish cardio-surgical robot RobIn Heart.*

## 1. WSTĘP

### 1.1. Rozważania ogólne

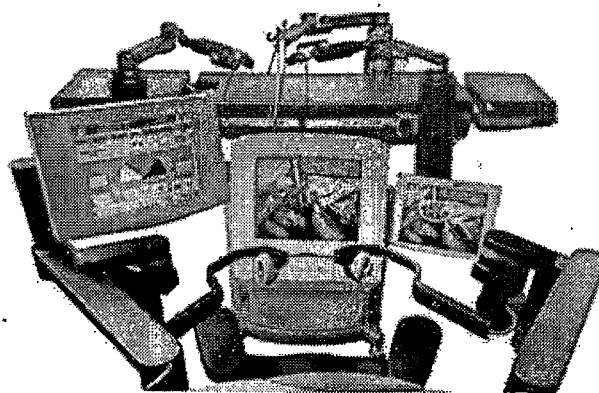
Manipulatory do operacji chirurgicznych, narzędzia laparoskopowe, telemanipulatory medyczne i roboty chirurgiczne zalicza się do najnowocześniejszych urządzeń wspomagających prowadzenie operacji chirurgicznych. Popyt na nie systematycznie rośnie i jest związany z rozwojem technik operacji tzw. małoinwazyjnych (Minimalny

Invasive Surgery - MIS). Większość tych urządzenia zostało wprowadzonych do praktyki medycznej w ostatnich latach i dotyczy tzw. zrobotyzowanej chirurgii (robotic surgery) z wykorzystaniem układów typu Master-Slave Manipulators (MSM). W projektowaniu, prototypowaniu, badaniach i wdrażaniu do produkcji wymagają one specjalnego podejścia, przy czym niezależnie od poziomu technicznego i inżynierskiego oraz wysokiego zaawansowania technologicznego danego rozwiązania, sukces jego wdrożenia jest najbardziej zależny od akceptacji ze strony lekarzy-chirurgów, operatorów specjalizujących się w operowaniu określonych narządów wewnętrznych. W Polsce jest to zupełnie nowa dziedzina medycyny, nie obsługiwana przez przemysł własny, narzędzia operacyjne są dostarczane przez producentów zagranicznych, przy czym są one drogie, natomiast wyposażenie dodatkowe w postaci urządzeń badawczych, treningowych, czy kontrolno-pomiarowych i testujących, przy zakupach narzędzi zazwyczaj nie jest brane pod uwagę.

Koncepcja stanowiska do badania manipulatorów medycznych powstała jako przedsięwzięcie własne w związku z opracowanym przez Fundację Rozwoju Kardiochirurgii w Zabrze, w ramach projektu badawczego KBN, robotem kardiochirurgicznym Robin Heart. Problematyka ta zarówno w Polsce jak i za granicą jest nowa, zagadnienie nie jest więc zbyt dobrze opisane w literaturze fachowej z tego zakresu. Zaproponowano własną metodę do prostego określania zdolności manipulatora medycznego do wykonywania pożądaných ruchów po różnych zadanych torach w przestrzeni z ograniczeniami. Metodę zastosowano do oceny manipulatora kulistego oraz wykorzystano w projekcie wstępnym manipulatora robota kardiochirurgicznego Robin Heart.

## 1.2. Roboty – telemanipulatory stosowane w chirurgii

Typowe stanowisko do operacji małoinwazyjnych z robotem ZEUS pokazano w widoku ogólnym na rys. 1.



Rys. 1. Stanowisko z robotem chirurgicznym ZEUS do operacji małoinwazyjnych.

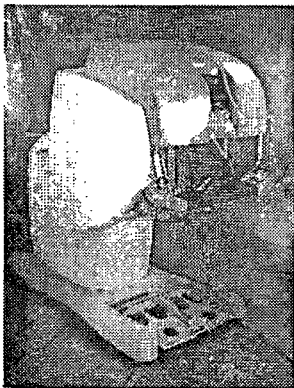
Najczęściej stanowisko takie zawiera:

- laparoskop (specjalny obiektyw o małej średnicy np. 6mm i długości do 500 mm),

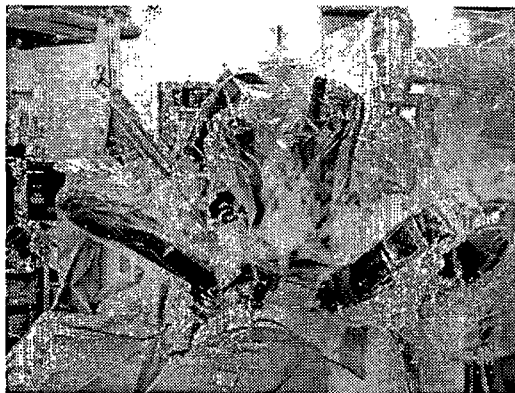
- lekką kamerę ze zminiaturyzowanym układem optoelektronicznym CCD (charge coupled device),
- źródło zimnego światła prowadzonego specjalnym łączem np. światłowodowym,
- wysokiej jakości monitor telewizyjny do wizualizacji obrazu z wnętrza przestrzeni operacyjnej,
- układ dostarczania gazu obojętnego (zwykle CO<sub>2</sub>) w obszar pola operacyjnego dla jego powiększenia przez utrzymanie w nim stałego ciśnienia,
- manipulatory medyczne (najczęściej trzy) do poruszania narzędziami,
- pulpit sterujący z urządzeniami zadawania ruchu.

Dla poprawy warunków prowadzenia operacji stosuje się także agregaty ssąco-płuczące, generatory do elektrokoagulacji, trokary (tzw. porty z zastawkami gazowymi) i specjalistyczne narzędzia wideochirurgiczne

ZEUS™ jest jednym z najbardziej zaawansowanych technicznie i technologicznie telemanipulatorów. W skład konstrukcji wchodzi niezależne urządzenia montowane do stołu chirurgicznego tj. kamera sterowana głosem oraz komplet dwóch ramion. W ZEUS-ie zastosowano m.in. system eliminacji drgań ludzkiej ręki i system przekładania ruchów dłoni na mikroruchy końcówki wewnątrz ciała pacjenta. W szczególności sposób dopracowano dokładność oraz precyzję ruchu. Najnowsza wersja ZEUS-a posiada 6 stopni swobody oraz możliwość zmiany końcówek w zależności od przeprowadzanego zabiegu. Wykorzystanie najnowocześniejszych technik pozwoliło podwyższyć ergonomię a tym samym zminimalizować zmęczenie chirurga w trakcie i po operacji. ZEUS™ wykorzystywany jest m.in. do usuwania woreczka żółciowego, ale głównym jego przeznaczeniem są zabiegi kardiochirurgiczne, podczas których możliwe jest przeprowadzenie operacji na bijącym sercu. Najnowsze układy zastosowane w urządzeniu pozwalają chirurgowi osiągnąć bardzo małe nacięcia – najmniejsza wartość nie przekracza średnicy ok. 3mm.



a)



b)

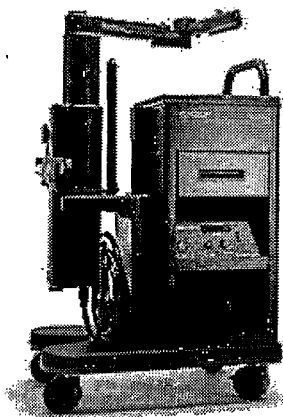
Rys. 2. Stanowisko operacyjne z robotem da Vinci.

a) konsola sterująca, b) stół operacyjny z ramionami robota zawieszonymi na specjalnej konsoli

W najnowszych rozwiązaniach zapewnia się obrazowanie trójwymiarowe, przy czym może być ono zrealizowane na dwa sposoby:

- przez wytworzenie na monitorze dwóch nałożonych na siebie obrazów spolaryzowanych z polaryzacją pod kątem  $+45^\circ$  dla oka prawego i  $-45^\circ$  dla oka lewego oraz zastosowanie specjalnych okularów polaryzujących. Obraz jest czarno-biały w odcieniach szarości, dodatkową wadą jest konieczność patrzenia przez okulary polaryzacyjne, ściemniające niezbyt czytelny obraz, system taki opracowany przez firmę Computer Motion jest zastosowany w robocie ZEUS pokazanym na rys. 1,
- przez zastosowanie podwójnego systemu kamer kolorowych podłączonych do podwójnego obrazowodu z wytworzeniem dwóch odpowiednio sprzężonych obrazów na dwóch osobnych monitorach, oddzielnie dla prawego i oddzielnie dla lewego oka; obraz jest kolorowy i charakteryzuje się dobrą czytelnością przestrzeni, pewną wadą jest konieczność patrzenia osobno prawym i osobno lewym okiem zwykle na dwa oddzielne monitory umieszczone wewnątrz specjalnej konsoli, system taki opracowany przez firmę Intuitive Surgical jest zastosowany w robocie da Vinci pokazanym na rys. 2. W tym rozwiązaniu możliwe jest wykorzystanie specjalnych okularów tzw. wirtualnych.

W operacjach laparoskopowych wygodnym asystentem sterowanym głosem operatora i zapewniającym precyzyjne manipulowanie obrazowodem laparoskopu z kamerą CCD jest robot AESOP, który pokazano na rys. 3. Robot ten jest zamocowany na przejeźdnym stoliku z wbudowanym układem sterowania i wyposażony w mocowaną



Rys. 3. Robot AESOP do asystowania w operacjach wideochirurgicznych  
– widok ogólny.

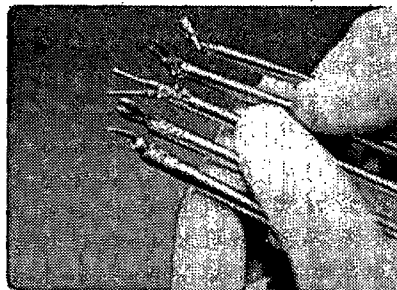
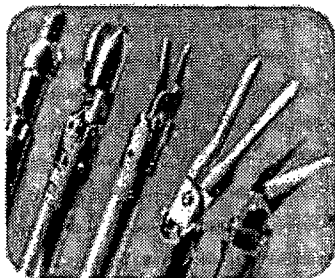
do stołu operacyjnego konsolę o trzech czynnych stopniach swobody i dwóch stopniach nie napędzanych tzn. biernych. Układy napędowe zapewniają ruch końcówki obrazowodu w przybliżeniu w układzie kulistym względem punktu stałego związanego z tzw. portem na ciele pacjenta. Robot ten został wprowadzony na rynek przez firmę Computer Motion w 1994 roku i jest wyposażony w system sterowania głosem w sposób selektywny dla konkretnego operatora. Oznacza to, że robot „nie słyszy” nikogo

innego poza lekarzem-operatorem. Do chwili obecnej odnotowano ponad 100 000 zabiegów z wykorzystaniem AESOP'a.

### 1.3. Narzędzia operacyjne stosowane w wideochirurgii

W operacjach laparoskopowych i teleoperacjach z zastosowaniem robotów wykorzystuje się narzędzia o specjalnej konstrukcji. Są to miniaturowe szczypce, nożyczki, skalpele, zaciski, zaciskotrzymaki zamocowane na cienkich (3-10mm średnicy) i długich (do 500mm) prętach o przekroju okrągłym wykonanych z materiałów o wysokiej wytrzymałości i sztywności najczęściej pokrytych z zewnątrz specjalnymi tworzywami zabezpieczającymi przed niepożądanymi reakcjami powierzchniowymi. Najnowsze narzędzia mają opływowe, wyprofilowane kształty, ich zadajniki mają wygodne, ergonomiczne, wysokofunkcjonalne kształty, w wypadku zastosowania napędu elektrycznego realizowanych ruchów, sterowane są z wykorzystaniem komputera, możliwe jest też ich sterowanie za pomocą komend wydawanych głosem operatora. Narzędzia takie mogą też być wyposażone w układy czujników do zdalnego badania organów wewnętrznych przez dotyk na drodze przetworzenia sygnałów w bodźce siłowe/naciskowe odczuwane przez badającego.

Na rys. 4 pokazano przykładowo typowe narzędzia operacyjne stosowane w wideochirurgii. Jak widać są to najczęściej narzędzia projektowane dla danego typu czynności jako jak najprostsze, natomiast należy dodać, że ich kształty i przede wszystkim zdolności manipulacyjne są bardzo dokładnie dopracowywane dla uzyskania jak najwyższego poziomu funkcjonalności.



a) końcówki narzędziowe, b) ręka operatora jako wskaźnik skali.

Rys. 4. Typowe narzędzia do stosowania w wideochirurgii.

### 1.4. Zalety nowoczesnych technik operacyjnych stosowanych w wideochirurgii

Roboty chirurgiczne są obsługiwane i kontrolowane ręcznie, bezpośrednio przez chirurga, jednak dzięki specjalnym rozwiązaniom systemowym, zapewniają one wysoki komfort pracy. Zwalniają lekarza-operatora z konieczności stałego skupiania uwagi na czynnościach operacyjnych, zapewniają znaczne zwiększenie precyzji, dokładności oraz pewności wykonywanych czynności, ale przede wszystkim uwalniają pomocnika od zmudnych i długotrwałych czynności związanych ze stabilnym utrzymywaniem kamery endowizyjnej. Istotne w budowie telemanipulatorów jest to, że

posiadają możliwość łatwego, manualnego demontażu ramion wewnętrznych oraz ręcznego przesuwania całego robota. Analogicznie do klasycznej chirurgii, końcówki wykonawcze telemanipulatorów można poddawać sterylizacji - zastosowanie tzw. szybkozłączki w konstrukcji ułatwia ten proces. Narzędzia są wielofunkcyjne, więc nie trzeba ich wymieniać w trakcie operacji, nad czym tradycyjnie czuwa instrumentariuszka. Pole operacyjne chirurg obserwuje na ekranie lub w okularze dającym efekt obrazu przestrzennego, przy czym kamerą steruje samodzielnie np. głosem. Jest to bardzo ważne, bowiem wielu lekarzy wykonujących operacje endoskopowe, podczas których za ustawienie kamery odpowiedzialny jest asystent, narzeka na brak stabilnego obrazu.

## **2. URZĄDZENIA BADAWCZE I SZKOLENIOWE**

### **2.1. Wspomaganie nauki laparoskopowych technik operacyjnych**

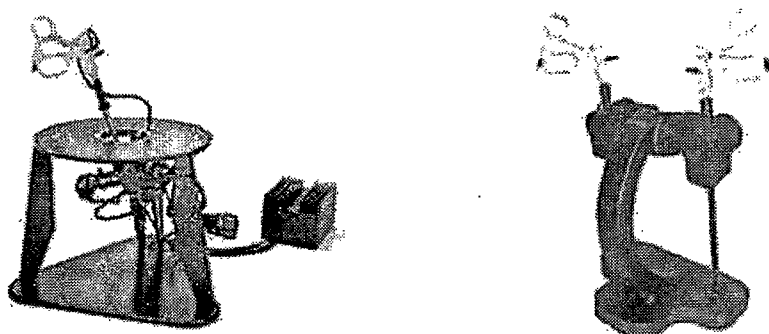
Nowa technika operacyjna – wideochirurgia wymaga odpowiedniego oprzyrządowania dla przygotowania zespołu operacyjnego do prowadzenia zabiegów oraz właściwego opanowania różnych czynności manualnych. Członkowie zespołu muszą na tyle sprawnie opanować poszczególne czynności oraz nauczyć się współpracy, aby zapewnić bezpieczeństwo i sprawnie wykonanie coraz bardziej złożonych zabiegów w celu uniknięcia powikłań. Należy tutaj wyjaśnić w sposób poglądowy, że manipulowanie nożyczkami zamocowanymi na długim sprężystym kiju podpartym na uginającej się gałęzi w celu odcięcia jabłka na czubku jabłoni dla pochwycenia go w podwieszony na końcu kija worek jest czynnością wymagającą dużej zręczności i sprytu. Od lekarza-operatora wymaga się porównywalnych zdolności, z tą różnicą, że musi on działać w sposób pewny i niezawodny a stawką jest zdrowie lub nawet życie operowanego pacjenta. Z tego powodu koniecznym jest szkolenie personelu medycznego i przede wszystkim młodych kandydatów na lekarzy-operatorów w zakresie podwyższania poziomu sprawności i doskonalenia technik operacyjnych w tej nowej dziedzinie.

Aktualnie na świecie w związku z rozwojem laparoskopii i wideochirurgii powstało wiele urządzeń do wspomaganie procesu nauczania czynności manualnych w chirurgii laparoskopowej i telemanipulacyjnej.

Urządzenia te muszą spełniać warunki zapewniające możliwość sztucznego odtworzenia warunków prowadzenia operacji na organizmie żywym z zapewnieniem realizacji względnych przemieszczeń poszczególnych narządów oraz ich ruchów cyklicznych (np. bicie serca). Dotyczy to szczególnie narzędzi bezpośrednio obsługiwanych ręcznie. Natomiast odrębną grupę narzędzi stanowią narzędzia o napędzie elektrycznym, które mogą być sterowane również na odległość za pomocą specjalnych zadajników z czujnikami pomiarowymi. Aktualnie dla takich narzędzi przetwarzanie sygnałów bardzo często odbywa się z wykorzystaniem komputera, co otwiera nowe możliwości w zakresie eliminacji niepożądanych składowych wymuszenia, np. tzw. tremoru mięśniowego

i przede wszystkim pozwala na skalowanie ruchu i korekcję tzw. „efektu lustrzanego”. Na rys. 5a pokazano jeden z najprostszych zadajników tego typu. Jest to typowy zadajnik ręczny narzędzia laparoskopowego zamontowany na okrągłym przecie

ułożyskowanym w specjalnym przegubie pozwalającym na ruch przestrzenny o czterech stopniach swobody w kulistym układzie współrzędnych z dodatkowym obrotem względem osi wzdłużnej narzędzia. Każda ze współrzędnych jest bezpośrednio przetwarzana na sygnał sterujący rzeczywistym narzędziem. Na rys. 5b pokazano zadajnik podwójny do sterowania dwoma narzędziami, których współpraca jest obserwowana na poziomie zadajnika. Urządzenie to wymaga pracy w bezwzględnych



a) b)  
Rys. 5. Zadajniki ruchu dla telemanipulatora chirurgicznego:  
a) zadajnik pojedynczy, b) zadajnik podwójny.

układach odniesienia zarówno zadajnika jak i narzędzia i dlatego wymaga dużej niezawodności i wysokiego poziomu dokładności zarówno przetwarzanych sygnałów, jak i bardzo dokładnej kalibracji i synchronizacji całego systemu. W wypadku utraty synchronizmu należy wycofać manipulator z narzędziem obszaru pola operacyjnego i ponownie zsynchronizować system. Jest to jego bardzo poważna wada. Korzystniejszym rozwiązaniem jest zapewnienie sposobu pracy zarówno zadajników jak i narzędzi w lokalnych układach odniesienia dopasowywanych każdorazowo do bieżącego stanu pracy z jednoczesnym przeskalowywaniem poszczególnych ruchów składowych.

## 2.2. Warunki prowadzenia szkoleń w dziedzinie telechirurgii

W celu najbardziej efektywnego wykorzystywania telemanipulatorów w chirurgii zostały opracowane urządzenia, które mogą być stosowane zarówno do nauki nowych technik, treningu usprawniającego manualnie, ale też przy opracowywaniu nowych technik jak całkowicie lub częściowo zautomatyzowane operacje, jak też podczas operacji z interaktywnie sterowanym prowadzeniem narzędzi inwazyjnych.

Skuteczne wprowadzenie na rynek robotów chirurgicznych jest, oprócz akceptacji przez chirurgów i możliwości włączenia robota w ogólny system „wspomagania leczenia” (tomograf komputerowy, system planowania i nawigacji), zależne od trzech głównych kryteriów:

Zapewnienia wspomaganie różnych obszarów zastosowań operacyjnych jednolitym zrobotyzowanym systemem,

- Narzucenie podstawowych wymagań wobec robotów stosowanych w medycynie takich jak niezawodność i dokładność pracy,
- Udowodnienia pewnej i bezpiecznej pracy zrobotyzowanego systemu w ramach jego certyfikacji.

Wysoką funkcjonalność zapewniają zastosowane w konstrukcjach odpowiednie pedały służące do sprawowania kontroli nad częścią mechanizmu. Do innowacyjnych rozwiązań należy zaimplementowanie systemu kontroli, w którym wykorzystywany jest głos do sterowania niektórymi elementami urządzenia.

Obecnie na sali operacyjnej wspomaga lekarzy wiele skomplikowanych urządzeń. Serce zastępuje się pompą sterowaną przez perfuzjonistów, oddychanie umożliwiają sztuczne płuca nadzorowane przez anestezjologów, chirurg stosuje noże termiczne i laserowe, o życiu pacjenta decyduje wiele płynów i gazów medycznych, które muszą być precyzyjnie dawkowane.

Przed wprowadzeniem urządzenia do seryjnej produkcji konieczne jest przejście wszystkich prób dopuszczających dany przyrząd do pracy na sali operacyjnej. Prace rozwojowe nad robotami chirurgicznymi absorbują dużą ilość czasu oraz wymagają zatrudnienia sztabu inżynierów konstruktorów

Nauka technik laparoskopowych jest dużo trudniejsza dla chirurgów niż nauka procedur „otwartej” chirurgii. Najtrudniejsze dla technik małoinwazyjnych są operacje na miękkich tkankach, które w dodatku są w nieustannym ruchu, np. bijące serce. Jednym z problemów do rozwiązania jest system nawigacji pozwalający na precyzyjne poruszanie narzędziami. Na przykład wykonując tzw. bypass, chirurg musi zszyć naczynia krwionośne o średnicy kilku milimetrów. Pole pracy, które chirurg ma do dyspozycji jest bardzo małe. Przestrzeń robocza ogranicza się do odległości między sercem a ścianą klatki piersiowej, która wynosi 2–3 cm. Małe pole manewru jest dodatkowo ograniczone przez nieustanny ruch serca. W tej sytuacji wykonanie zabiegu za pomocą instrumentów wyposażonych w prawie półmetrowe ramię, o średnicy  $8 \div 10$  mm, nie należy do prostych zadań.

Prace rozwojowe mające na celu wprowadzenie nowych usprawnień są w toku. Z myślą o bezpieczeństwie pacjenta oraz wygodzie chirurga pracuje się nad zastosowaniem w manipulatorach czujników dotyku i zbliżenia. Dostarczać będą informacji o zetknięciu narzędzia z obiektem w ciele pacjenta. Inne nowatorskie rozwiązania to np. zastosowanie sprzężenia zwrotnego siły (ang. *feedback force*) i dotyku, które może być przekazywane lekarzowi przez manetki lub sygnalizowane dźwiękowo poprzez głośniki w konsoli albo wizualnie na monitorze (przy czym wysokość tonu lub jaskrawość koloru może zależeć od siły). Zmysł dotyku jest bardzo ważny i często wykorzystywany; w otwartych operacjach pozwala chirurgowi wyczuć strukturę pod palcami. Ważne naczynia i kanały są zazwyczaj pokryte tkanką łączną i aby uniknąć uszkodzenia ich obecność jest raczej wyczuwana niż dostrzegana. Na dzień dzisiejszy bardzo często lekarze szkolą się podczas rzeczywistego zabiegu lub przeprowadzają próby na zwierzętach. Trening na sali operacyjnej powoduje wzrost ryzyka i wydłuża czas operacji, w rezultacie rośnie koszt i niebezpieczeństwo całego zabiegu. Natomiast doświadczenia na zwierzętach są drogie a w dodatku budowa wewnętrzna zwierząt nie jest wierną kopią ludzkiej anatomii. [1], [10], [11], [12].



Należy wyraźnie zaznaczyć, że technika laparoskopowa oraz wideochirurgia z zastosowaniem robotów i telemanipulatorów, jakkolwiek są technikami nowoczesnymi i już wysoce pożądanymi przez pacjentów, to jednak dla lekarza-operatora są to techniki bardzo trudne, często nieprzyjazne manualnie i o tyle mało intuicyjne, że ich pewne stosowanie przez konkretnego operatora jest silnie zależne od jego dotychczasowej praktyki, której zdobycze mogą stać w otwartej sprzeczności z nowopowstałymi lepszymi urządzeniami. Niezależnie od tego doświadczony lekarz w swojej praktyce musi czuć się niezwykle pewnie i dlatego jeśli zaczyna stosować nowe doskonalsze techniki, to wyraźnie zastrzega sobie, że w wypadku braku możliwości wykorzystania w pełni nowej techniki, musi mieć możliwość wykonać zabieg dobrze sobie znaną starszą techniką. W tej sytuacji konstruktorzy nowych rozwiązań muszą dostosowywać swoje działania do wyraźnych poleceń lekarzy.

### 2.3. Podwójny sposób rozwoju telechirurgicznych technik operacyjnych

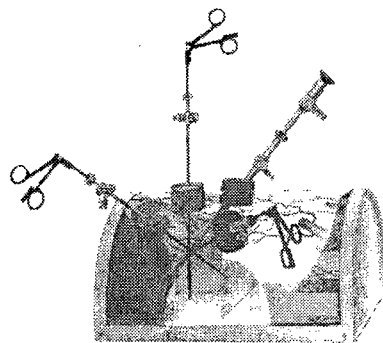
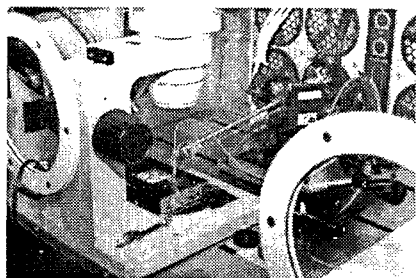
Każdy pacjent oczekujący na zabieg chirurgiczny ma zwykle jedno marzenie: być operowanym przez doświadczonego chirurga. Doświadczonego, a więc takiego, który wykonał już pewną liczbę operacji identycznych lub zbliżonych do zabiegu planowanego. W takiej postawie – jakkolwiek w pełni naturalnej – kryje się jednak pewna sprzeczność logiczna: skoro wszyscy chcą być operowani tylko przez doświadczonych chirurgów, to w jaki sposób mają oni zdobywać to doświadczenie?

Komplikacje związane ze zdobywaniem wiedzy i doświadczenia przez chirurgów wymusiły opracowanie nowoczesnych metod dydaktycznych. Do pomocy wykorzystuje się systemy komputerowe, za ich pomocą odtwarza się całe laboratorium wraz z oprzyrządowaniem i narzędziami. Rozwój techniki pozwala na modelowanie coraz to dokładniejszych, wypełnionych szczegółami organów, na których możemy zaobserwować najmniejsze żyły i naczynia. Przypuszcza się, iż przyszłe umiejętności lekarskie rozwijane będą w rzeczywistości wirtualnej. Stworzenie realistycznego środowiska treningowego pozwoli na wyszkolenie przyszłych chirurgów, którzy zaznajamiani będą z najnowszymi technikami medycznymi.

Nauka oparta na szkoleniu komputerowym ma dużo potencjalnych zalet. Jest interaktywną, niewymagającą obecności instruktora metodą, więc studenci mogą praktykować w wolnym czasie. Na potrzeby szkoleniowe mogą być odtworzone dowolne zmiany patologiczne lub anatomiczne w celu zdobycia przez przyszłych lekarzy jak największego doświadczenia przed przystąpieniem do rzeczywistych operacji. Studenci próbujący różnych technik operacyjnych, są w stanie obserwować ludzką anatomię, której nie przyjrzeliby się podczas operacji. Można tworzyć różne wersje tej samej operacji, powtarzać wybrane fragmenty, wykonać operacje, które mogą dopiero się wydarzyć nie narażając w ten sposób pacjentów na mogące zaistnieć błędy. Brytyjska firma Manchester Royal Infirmary zaprojektowała i wprowadziła na rynek system, który nazwała *MIST (Minimally Invasive Surgical Trainer)*. Służy on do prowadzenia interaktywnych szkoleń chirurgów w zakresie zabiegów operacyjnych. System *MIST* umożliwia ocenę umiejętności chirurga w funkcji czasu jaki potrzebuje on na przeprowadzenie wirtualnego zabiegu. Oczywiście *MIST* nie tylko ocenia, ale umożliwia komputerowe ćwiczenie konkretnych zabiegów chirurgicznych na danym -

przygotowywanym do operacji - pacjencie i jego wirtualnych organach wewnętrznych. Obraz organów wewnętrznych pacjenta uzyskiwany jest z badań diagnostyki obrazowej wykonywanych przy pomocy systemów tomografii komputerowej i rezonansu magnetycznego. Tak więc, zanim dochodzi do prawdziwej operacji, można wykonać dowolną liczbę prób i wariantów jej przeprowadzenia. *MIST* jest także doskonałym partnerem do ćwiczeń w prowadzeniu zabiegów z wykorzystaniem telemedycyny i robotów medycznych.

Zdaniem autorów w pracach rozwojowych nad nowymi narzędziami dla telemanipulacji w chirurgii należy uwzględnić możliwość obsługi tych narzędzi z użyciem tradycyjnych zadajników ręcznych lub w proponowanych zestawach oferować narzędzia podwójne. Takie podejście wymaga również odpowiedniego podejścia w szkoleniu personelu.



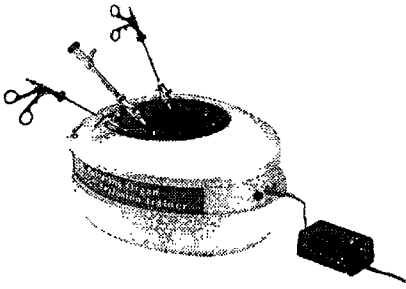
Rys. 6. Eksperymentalne badania narzędzi wideochirurgicznych:

a) autoklaw do badania narzędzi o napędzie elektrycznym, b) komora z narzędziami do ćwiczeń z zakresu technik laparoskopowych

Na rys. 6a pokazano autoklaw z umieszczonym wewnątrz narzędziem o napędzie elektrycznym, które sterowane sygnałami z zadajników np. takich jak te pokazano na rys. 5 ma za zadanie odtwarzać w określony sposób ruchy zadajnika dla realizacji zadania operacyjnego. Równoległe wskazane jest aby ten sam operator był szkoleny w zakresie tych samych technik operacyjnych na typowym urządzeniu do ćwiczeń z zakresu technik laparoskopowych, np. takim, jakie pokazano na rys. 6b.

Zestaw narzędzi pokazany na rys. 6b jest typowym zestawem stosowanym do operacji. Jest to obrazowód z oświetlaczem oraz nie pokazana kamera i najczęściej dwa narzędzia obsługiwane obydwoma rękami operatora. W operacjach wymagających większej liczby narzędzi są stosowane dodatkowe statywy lub operacje prowadzi dwóch operatorów. Najnowszym rozwiązaniem w tym zakresie jest tzw. pelwitrenner pokazany na rys. 7a.

Urządzenia te są wykorzystywane m. in. do nauczania nawyku patrzenia w ekran monitora i wytworzenia nawyku koordynacji ruchów rąk z ruchami końcówek narzędziowych w polu operacyjnym obserwowanym na monitorze, nabrania nawyku pracy oburącz, nabycia sprawności w szerokim zakresie czynności operacyjnych, opanowania zasad szycia, wiązania węzłów i kontroli obecności w polu operacyjnym pozostałości użytych zbędnych materiałów jak też i pobranej tkanki.



a)



b)

Rys. 7. Pelwitrenner do nauki operowania narzędziami wideochirurgicznymi na narzędziach poruszających się:

a) widok ogólny komory treningowej, b) stanowisko z zestawem narzędzi, obrazowodem z kamerą, układem zasilająco-sterującym i monitorem wizyjnym.

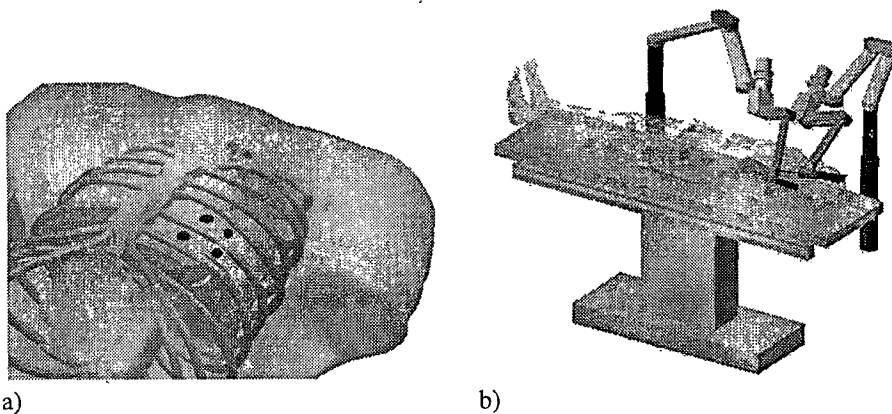
### 3. STANOWISKO PW DO BADANIA MANIPULATORÓW MEDYCZNYCH

#### 3.1. Modele wirtualne wykorzystywane w projektowaniu robotów medycznych

Wysokie wymagania współczesnej mikrochirurgii oraz intensywny rozwój technik operacyjnych np. na sercu (wszywanie tzw. by-pass'ów) spowodowały konieczność opracowania nowych wysoce funkcjonalnych manipulatorów dla nowych technik operacyjnych. Dalszy postęp prac w tym zakresie wymaga wykonania odpowiednich modeli i badań doświadczalnych dla określenia ich rzeczywistych właściwości. W ramach prac przejściowych i dyplomowych prowadzonych w okresie ostatnich trzech lat przez głównego autora pracy opracowano kilka projektów manipulatorów dla robotów medycznych oraz kilka nowych narzędzi laparoskopowych. Urządzenia te wymagają obszernych, intensywnych badań co do ich przydatności i funkcjonalności oraz określenia rzeczywistego zakresu zastosowań. We wstępnej fazie projektu opracowano wirtualny model klatki piersiowej z żebrami, płucami, workiem osierdziowym i zewnętrznymi ściankami serca, pokazany w widoku ogólnym na rys. 8. Do budowy realistycznego modelu wirtualnego wykorzystano dane, pozyskane i opracowane w ten sposób, aby dokładnie opisywały całą strukturę wewnętrzną ciała pacjenta. Tych danych dostarczył zbiór równoległych przekrojów rozważanego obszaru ciała. W praktyce przekroje takie uzyskuje się nieinwazyjnymi technikami rezonansu magnetycznego (MRI), tomografii komputerowej (CT) lub w przypadku martwego, zamrożonego ciała za pomocą specjalnej gilotyny.

Przed przystąpieniem do budowy komputerowej anatomii człowieka rozważono kilka sposobów zgromadzenia danych wejściowych. W praktyce wykorzystano materiały internetowe znane jako Visible Human Project. Pokazany na rys. 8a. trójwymiarowy

model klatki piersiowej z narządami wewnętrznymi wykorzystano do badania własności modeli wirtualnych nowoprojektowanych manipulatorów medycznych przeznaczonych do operacji serca. Metoda ta pozwoliła dokładniej sprecyzować założenia techniczne projektów oraz znacznie skrócić czas opracowania prototypu.

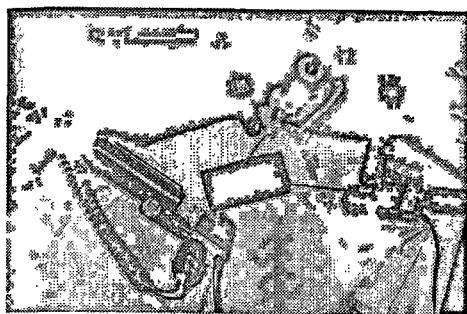


Rys. 8. Wirtualny model środowiska do badania manipulatorów medycznych:  
a) model klatki piersiowej, b) model pacjenta na stole operacyjnym do badania funkcjonalności manipulatorów

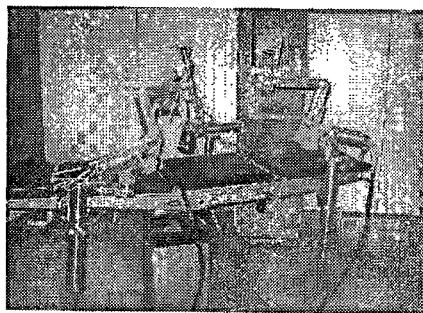
Należy zaznaczyć, że z wykorzystaniem wirtualnego modelu pokazanego na rys. 8a, dokumentację manipulatora medycznego opracowano w trójwymiarowej przestrzeni systemu UNIGRAPHICS, co pozwoliło na wprowadzanie różnych poprawek w konstrukcji robota już na etapie projektowania oraz wizualizowanie typowych zadań i własności, które trudno zrealizować nawet na prototypie. Na rys. 8b. pokazano dwa manipulatory zamocowane na konsolach nad stołem operacyjnym. Narzędzia programowe takie jak UNIGRAPHICS i ADAMS pozwoliły w prosty i szybki sposób na dokonanie weryfikacji opracowanych modeli. Np. badań symulacyjnych wynika, że manipulatory można łatwo ustawić nad stołem operacyjnym w ten sposób, aby zapewnić miejsce na trzeci manipulator z endoskopem.

### 3.2. Laboratoryjne stanowisko badawcze do badania prototypów

Rzeczywiste rozwiązania konstrukcyjne manipulatorów robotów charakteryzują się własnościami, których wpływ na jakość realizacji zadań jest bardzo trudno przewidzieć na etapie opracowywania projektu konstrukcyjnego. Np. istnienie luzów czy podatności konstrukcji oraz ich ujawnianie się podczas pracy w warunkach istnienia sił ciężkości może mieć bardzo istotny ale nie zawsze przewidywalny wpływ na pracę tych urządzeń. Opracowane prototypy należy więc badać w warunkach laboratoryjnych. W tym celu w laboratorium robotyki Zakładu Teorii Maszyn i Robotów powstało stanowisko badawcze do badania manipulatorów medycznych. Należy zaznaczyć, że w trakcie prac nad manipulatorami dla robota Robin Heart jednym z podstawowych problemów, na jakie natknęli się konstruktorzy było sformułowanie założeń projektu, zarówno funkcjonalnych jak i technicznych. Ogólna wiedza z zakresu manipulatorów dotycząca własności manipulatorów robotów przemysłowych okazała się niewystarczająca.



a)

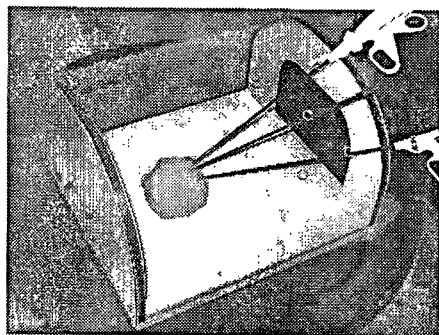


b)

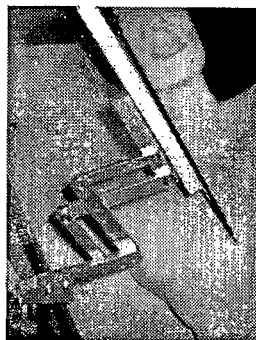
Rys. 9. Typowe stanowiska operacyjne z robotami:

a) ZEUS, b) RobIn Heart 2.

Należało wypracować nowe, własne metody i zasady projektowania oraz opracować zupełnie nowe koncepcje podstawowych rozwiązań konstrukcyjnych uzupełnione odpowiednimi modelami również materialnymi. Modele takie opracowano z wykorzystaniem techniki komputerowej, doprecyzowano założenia i wykonano wstępne wersje manipulatorów robota Robin Heart 2, który jest pokazany na rys. 9b.



a)



b)

Rys. 10. Stanowisko do badania manipulatorów medycznych:

a) widok ogólny, b) fantom fragmentu narządu, obok widoczne narzędzia.

Opracowano własną wersję stanowiska do badania manipulatorów medycznych, której elementy składowe pokazano na rys. 10. Wewnątrz specjalnego pojemnika o przezroczystej ścianie górnej z otworami reprezentującymi istnienie portów jest umieszczany preparat, na którym są prowadzone badania możliwości manipulacyjnych narzędzi zamocowanych do manipulatorów. manipulatorów konstrukcji stanowiska przewidziano również model fantomu z podatnego tworzywa sztucznego pokazany na rys. 10b, na którym bada się przewidywane rozmieszczenie portów. Wykonane badania pokazały wysoką funkcjonalność nowoprojektowanych konstrukcji oraz przydatność zastosowanych modeli i innych elementów stanowiska.

#### 4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W referacie przedstawiono problematykę ogólną manipulatorów medycznych oraz wyniki wstępnych prac dotyczących konstrukcji stanowiska do badania manipulatorów medycznych, które powstaje na Wydziale MEiL Politechniki Warszawskiej. W skład *stanowiska* wchodzi zarówno elementy komputerowych modeli wirtualnych, wykorzystywane w początkowej fazie projektów manipulatorów robotów medycznych, jak i modele materialne do określania własności manipulacyjnych prototypów. *Stanowisko* ma stanowić początek budowy *Laboratorium badania manipulatorów medycznych*, w którym będzie się prowadzić badania mające na celu określenie właściwości nowych konstrukcji w zakresie dokładności i powtarzalności realizacji zadań ruchowych manipulatorów medycznych i ocenę ich własności manipulacyjnych do przewidywanych zadań operacyjnych jak również badania dla określania potencjalnych obszarów zastosowań nowych konstrukcji.

Przewiduje się także prowadzenie badań manipulacji obiektami dla opracowania modeli do ich analiz w przestrzeni wirtualnej z jednoczesnym badaniem odczuć związanych z masą, bezwładnością, tarciem, temperaturą, fakturą przemieszczanych przedmiotów, przy czym planuje się opracowanie elementów symulatorów wytwarzających odczucia takie same jak podczas przemieszczania identycznych przedmiotów w rzeczywistości. Urządzenia takie zwane *haptic devices* pojawiły się już w ośrodkach zachodnich, lecz są bardzo drogie i nie uwzględniają wielu ważnych czynników potrzebnych konstruktorowi dla dokładnego sprecyzowania warunków, jakim powinien odpowiadać dobry manipulator medyczny i chirurgiczny współczesnego robota do operacji medycznych. Odrębnym, bardzo ważnym podejmowanym zagadnieniem będą badania funkcjonalności i bezpieczeństwa użytkowania manipulatorów medycznych.

Robotyka medyczna jest dziedziną bardzo młodą, która pojawiła się właściwie w ostatnich kilku latach. W aktualnych warunkach dziedzina ta wymaga wypracowania swoich własnych metod badawczych dotyczących projektowania, konstrukcji, technologii i badań laboratoryjnych. Przedstawiony projekt *stanowiska do badania manipulatorów medycznych* jest jednym z pierwszych, w którym autorzy od samego początku starali się zadbać o kompleksowe ujęcie stawianych zagadnień i problemów. W najbliższym czasie planuje się wykorzystanie *stanowiska* do badań doświadczalnych kolejnych wersji manipulatorów dla powstających robotów medycznych.

#### Podziękowania:

Praca powstała w ramach projektu badawczego sfinansowanego jako praca badawcza własna przez Jego Magnificencję Rektora Politechniki Warszawskiej w roku 2003. Autorzy pragną podziękować Fundacji Rozwoju Kardiologii za inspirację w zakresie tematu dotyczącego konstrukcji i badań nad robotami medycznymi, w szczególności nad robotem kardiologicznym Robin Heart...

## Piśmiennictwo:

- [1]. Światowe zasoby sieci Internet.
  - <http://www.computermotion.com> producent robotów kardiochirurgicznych
  - <http://www.intuitivesurgical.com/> firma produkująca robota DaVinci
  - <http://www.kardiochirurgia.pl>
  - <http://www.nlm.nih.gov> strona poświęcona Visible Human Project
  - <http://life.bio.sunysb.edu/morph> strona aplikacji tpsDIG
  - <http://www.laparoscopy.com> – strona dotycząca stosowanych obecnie narzędzi laparoskopowych oraz opisująca laparoskopową technikę operacji
  - <http://robotics.eecs.berkeley.edu/medical/>
  - <http://wiem.onet.pl> Wielka Internetowa Encyklopedia Multimedialna
- [2]. Przemysław Kiciak – *Podstawy modelowania krzywych i powierzchni. Zastosowania w grafice komputerowej*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000.
- [3]. Michał Jankowski – *Elementy grafiki komputerowej*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1990.
- [4]. John Lansdown – *Grafika komputerowa*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1990.
- [5]. Josef Stoer, Roland Bulirsch – *Wstęp do analizy numerycznej*. Państwowe Wydawnictwa Naukowe, Warszawa 1987.
- [6]. Aleksander Michajlik, Witold Ramotowski - *Anatomia i fizjologia człowieka*. Wydawnictwo Lekarskie PZWL, Warszawa 1994.
- [7]. Witold Sylwanowicz – *Anatomia człowieka*. Państwowy Zakład, Wydawnictw Lekarskich, 1974.
- [8]. Baumgartner, Stuart, Gott, Schlossberg - *Atlas Of Cardiac Surgery*
- [9]. Witold Sylwanowicz – *Mały Atlas Anatomiczny*. Państwowy Zakład Wydawnictw Lekarskich, 1987.
- [10]. Fundacja Rozwoju Kardiochirurgii – Robot Kardiochirurgiczny - Polski Projekt. Wstępne założenia projektowe, Zabrze 2001.
- [11]. Świat Nauki:
  - sierpień 1999
  - grudzień 2000
  - luty 2001
- [12]. Wiedza i Życie, sierpień 2000
- [13]. Chirurgia laparoskopowa, praca zbiorowa pod red. W. Kostewicza, PZWL, Warszawa 2002,
- [14]. Prace przejściowe i dyplomowe wykonane w latach 2002-2004 pod kierunkiem dr inż. K. Mianowskiego przez studentów kierunku Automatyka i Robotyka na Wydz. MEiL PW.