

dr Zbigniew Nawrat<sup>1,2</sup>,  
dr hab. Leszek Podśędkowski<sup>3</sup>,  
dr inż. Krzysztof Mianowski<sup>4</sup>,  
dr inż. Paweł Kostka<sup>1,3</sup>,  
mgr Zbigniew Małota<sup>1</sup>,  
mgr inż. Piotr Wróblewski<sup>3</sup>,  
mgr inż. Agnieszka Wróblewska<sup>3</sup>,  
mgr inż. Michał Baczyński<sup>3</sup>,  
prof. Edward Jezierski<sup>3</sup>,  
prof. Zbigniew Religa<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>) Fundacja Rozwoju Kardiochirurgii,

<sup>2</sup>) Śląska Akademia Medyczna,

<sup>3</sup>) Politechnika Łódzka,

<sup>4</sup>) Politechnika Śląska,

<sup>5</sup>) Politechnika Warszawska

## ROBIN HEART 2003 - AKTUALNY STAN REALIZACJI PROTOTYPU

*Streszczenie: Praca jest poświęcona przedstawieniu projektu polskiego robota kardiochirurgicznego, który prowadzony jest przez Fundację Rozwoju Kardiochirurgii w Zabrze przy współpracy z ośrodkami naukowymi z Łodzi i Warszawy. Przedstawiono założenia konstrukcji telemanipulatora i wnioski dotyczące aktualnego stanu praktycznej realizacji projektu.*

### ROBIN HEART – THE ACTUAL STATE OF THE PROJECT REALIZATION

*Abstract: This paper is devoted to the project of polish cardiac surgery robots, realized by the team of Foundation of Cardiac Surgery Development, Zabrze, in cooperation with research centers in Łódź and Warsaw. Assumptions of manipulator construction as well as conclusions from first practice realization stages are presented.*

## 1. WPROWADZENIE

Osiągnięcia techniczne zmieniły obraz medycyny naszego wieku. Zabiegi chirurgiczne wykonywane są przy pomocy coraz lepszych, precyzyjniejszych narzędzi. Telemedycyna, rozwój oprzyrządowania stosowanego w chirurgii małoinwazyjnej i wreszcie zastosowanie robotów wspierających chirurgów w przeprowadzaniu coraz bardziej skomplikowanych operacji to wynik współpracy lekarzy i inżynierów. W typowy sposób dostęp do serca uzyskuje się przez sternotomię – szerokie otwarcie klatki piersiowej z rozcięciem mostka. Wprowadza ona znaczny uraz tkanek, powoduje zagrożenie infekcją oraz innymi komplikacjami. By tego uniknąć chirurdzy starają się

obecnie większość operacji wykonać w sposób mniej inwazyjny, przez niewielkie otwory w ciele pacjenta stosując kamery endoskopowe i nowe, cieńsze i dłuższe narzędzia. Kardiochirurdzy rozwijając technikę endoskopową wykonywania zabiegów napotkali barierę możliwości precyzyjnego wykonania przy pomocy dostępnych narzędzi operacji pomostowania naczyń wieńcowych. W czasie tej operacji wykonuje się zespolenie, zszywanie cienkich, kilkumilimetrowej średnicy naczyń krwionośnych; wieńcowego i wszczepu, tzw.graftu naczyniowego. Poprawę ergonomii pracy operatora udało się uzyskać dzięki opracowaniu nowego narzędzia, teleoperatora z komputerem nadzorującym. W celu zwiększenia precyzji urządzenie to pozwala przeskalowywać ruch dłoni poprzez zadajnik manipulatora, na odpowiednio dokładne ruchy narzędzia. Usuwa również drżenie dłoni. Nadzór ruchem odbywa się za pomocą obserwacji wzrokowej. Obrazowanie zabiegu prowadzone jest za pomocą stereowizyjnej kamery endowizyjnej sterowanej głosem lub dłonią.

Amerykańskie roboty kardiochirurgiczne wywodzą się z zarzuconego programu wojen gwiazdnych prowadzonego przez NASA ( firma Computer Motion CMI) oraz Pentagon ( firma Intuitive Surgical IS). Pierwszy system pozycjonowania endoskopu wprowadziła w 1994 na rynek firma Computer Motion (Goleta, CA). AESOP 1000 (Auto Endoscopic System for Optimal Positioning) wprowadzony w 1994 r. był pierwszym na świecie mechanicznym asystentem chirurga. W styczniu 1998 zespół francuski [1] wykonał pierwszą na świecie endoskopową operację pojedynczego pomostu wieńcowego CABG (LITA – LAD; left internal thoracic artery – left anterior descending), w maju pierwszą operację wewnątrz serca - plastykę zastawki mitralnej. W tym samym miesiącu dołączył do niego zespół niemiecki z Lipska [2] . Operacje wykonano za pomocą robota da Vinci firmy Intuitive Surgical (Mountain View, CA). W Katedrze Kardiologii Katowicach, jako pierwszym ośrodkiem w Polsce w czasie pobierania tętnicy piersiowej jest stosowany (około 300 razy) asystent-robot, AESOP. W roku 2002 stosując wypożyczonego robota Zeus (zresztą tego samego, który wykonał pierwszą teleoperację transatlantycką) wykonano pierwsze w Polsce operacje stosując pełny zestaw robota kardiochirurgicznego (K.Cisowski, A.Bochenek.)



Rys.1 Robot Zeus (po lewej) i robot da Vinci (po prawej) przy stole operacyjnym

Roboty operujące Zeus i da Vinci od 1998 pracują na niespełna 300 salach kardiochirurgicznych na świecie. Można szacować, że do dziś kilka tysięcy operacji na sercu wykonano z pomocą robotów, ale w pełni endoskopowo, od początku do końca operując tylko robotem pewnie nie więcej niż 10% tej liczby. Wprowadza się techniki

„wiązane” w których część zabiegu, znacznie zmniejszająca traumatyzację, wykonywana jest za pomocą robota a następnie operacja jest wykonywana w sposób małoinwazyjny (MIDCAB, OPCAB). Najistotniejszym jednak obszarem zastosowania robotów jest wykonywanie zabiegów bez zatrzymywania serca. Bijące serce jest lokalnie, w miejscu dokonywania zszycia, unieruchomione za pomocą stabilizatora.

## 2. POLSKI PROJEKT ROBOTA KARDIOCHIRURGICZNEGO

Prace nad polskim robotem finansowane przez KBN i Fundację Rozwoju Kardiologii w Zabrzu prowadzone są od 2000 r. pod kierunkiem prof. Zbigniewa Religii. Projekt badawczy realizowany przez multidyscyplinarny zespół w kilku ośrodkach naukowych w Polsce obejmuje swoim zakresem opracowanie różnych strategii operacji, symulacje przebiegu operacji, opracowanie ergonomicznego stanowiska pracy chirurga, zaprojektowanie układu sterowania i konstrukcji mechanicznej manipulatora oraz wykonanie niezbędnych modeli i prototypu [3,4]. Polski robot został nazwany: RobIn Heart.

### 2.1 Założenia

Przedmiotem projektu badawczego jest wykonanie oryginalnego, wielozadaniowego robota zdalnie sterowanego przez chirurga do wspomagania oraz wykonywania operacji na sercu lub operacji polegającej na modyfikacji układu sercowo-naczyniowego. Robot będzie miał strukturę segmentową umożliwiającą zestawienie sprzętu dla różnych typów operacji. Samodzielny człon stanowić będzie kamera endowizyjna o szerokim zasięgu stosowania (opcja - sterowanie głosem), powstała ona przy ścisłym współdziałaniu z lekarzami, konsola sterownicza będzie ergonomiczna, wygodna i wydajna [4].

Robot kardiologiczny jest manipulatorem kopiującym, telemanipulatorem. Układ mechaniczny realizuje różne czynności manipulacyjne za pomocą siłowników elektrycznych. Sześć stopni swobody jest koniecznym warunkiem sprawnego poruszania końcówką; trzy stopnie swobody kierują narzędzie manipulatora w kierunku zadanej pozycji, trzy pozostałe służą do odpowiedniej orientacji narzędzia w przestrzeni.

Na podstawie badań na sercu świńskim określono (FRK), że obciążenie narzędzi w czasie wykonywania typowych elementów operacji wynosi kilka N. W czasie eksperymentu polegającym na szyciu i cięciu serca świńskiego za pomocą typowych narzędzi chirurgicznych oraz narzędzi laparoskopowych (na specjalnym modelu) określono niezbędną liczbę stopni swobody dla wykonania danych czynności. Oceniono wpływ ograniczonej swobody poruszania narzędzi na sprawność, precyzję i szybkość wykonania czynności. Przykładowo: w przypadku szycia potrzebne okazały się ruchy w trzech stawach (ramiennym, łokciowym i nadgarstkowym), przy czym ruch w stawie nadgarstkowym odbywał się w dwóch osiach (razem 4 stopnie swobody). Dodatkowo niezbędny był ruch łapania/puszczania igły przez końcówkę roboczą (+1 stopień swobody).

Podstawowe wymagania jakimi powinny cechować się roboty kardiologiczne:

- stabilny obraz pola operacyjnego
- duża sprawność oraz precyzja wykonywanych ruchów

- bezpośrednie sterowanie i kontrola przez chirurga
- skalowanie ruchów operatora
- minimum 7 stopni swobody ( 3 stopnie swobody na ramię i 4 na narzędzie .

Robot operuje w niewielkiej przestrzeni uzyskanej po opadnięciu jednego płuca ( w czasie operacji jedno płuco może przejąć funkcję oddychania, z drugiego usuwane jest powietrze) i stałym nadciśnieniu uzyskanym przez wdmuchiwanie dwutlenku węgla ok. 10 mmHg w pod powłoki ciała (przestrzeń klatki piersiowej). Pole operacji ma wysokość często tylko ok. 2-3 cm nad sercem co stanowi duże wyzwanie dla konstruktora narzędzi. Końcówka narzędzia powinna mieć możliwość wykonania pełnego obrotu z imadłem ustawionym prostopadle do wysięgnika w przestrzeni cylindrycznej o średnicy 1 cm. Założono maksymalną średnicę narzędzi  $\phi$  10 mm. Kąt odchylenia narzędzia laparoskopowego mieści się pomiędzy kątami  $+75^\circ$  do  $-75^\circ$ . Kolejne założenie dotyczy liczby stopni swobody kiści do zmiany orientacji. W niektórych przypadkach (nóż koagulacyjny lub harmoniczny wystarczy 1 stopień swobody (DOF) – obrót wokół osi części prowadzącej narzędzia. Najczęściej jednak dołożeniu jednego lub dwóch DOF poprawia możliwości manewrowania narzędziem w stopniu umożliwiającym wykonywanie operacji. Dodatkowo w niektórych narzędziach jak nożyczki czy chwytak konieczny jest jeden stopień swobody zapewniający ruch roboczy narzędzia. Zgodnie z założeniami projektowymi robot powinien zapewnić dokładność przemieszczenia końcówki ok. 0,1 mm (zespalone naczynia mają średnicę 1 mm).

## 2.2 Realizacja

W fazie projektowania wykonano szereg modeli i rozwiązań prototypowych. Testowano sterowanie ruchem dłoni i głosem modeli robotów o różnej budowie i sposobie działania. Prowadzone są prace nad inteligentną bazą danych. Przywoływana głosem umożliwi pokazanie na ekranie informacji diagnostycznych oraz danych z symulacji operacji. Lekarz-operator będzie mógł w każdej chwili wykorzystać program doradczy. Opracowywano szereg modeli zadajników ruchu wykorzystujących różne możliwości i doświadczenie operatorów. Jest wśród nich rozwiązanie wykorzystujące typowy uchwyt laparoskopu jako dźwążek sterowniczy. Planowane jest również wprowadzenie przestrzeni wirtualnej do wspomagania pracy chirurga. Roboty, jako pierwsze w historii narzędzie do wykonywania operacji stanowią środek umożliwiający wykonanie operacji uprzednio zaplanowanej i przetrenowanej na stanowiskach symulacyjnych . Opracowywane są nowe narzędzia, o znacznej ruchliwości, wielofunkcyjne i półautomatyczne skracające czas operacji i znacznie zwiększające możliwości operatora oraz bezpieczeństwo zabiegu. Zupełną nowością, w skali światowej, są próby opracowania oprzyrządowania robota przez specjalne półautomatyczne narzędzia do wykonania operacji małoinwazyjnego wszczępienia komór wspomaganie serca. Na Konferencji Roboty Kardiochirurgiczne 2002 w Zabrze zostało przedstawione rozwiązanie złożone z przed-prototypu ramienia robota RobIn Heart oraz kamerą endowizyjną umieszczoną w sferycznym modelu ramienia (Rys. 2). Razem tworzą układ, w którym jedno ramię sterowane komputerem a drugie zadajnikiem manualnym (joystic) lub głosem umożliwia zaprezentowanie podstawowych zasad powstającego robota.

### 3 KONSTRUKCJA MECHANICZNA ROBIN HEART'A

Prace nad projektem części mechanicznej RobIna zostały podzielone na poniżej wymienione części odpowiadające poszczególnym fragmentom konstrukcji:

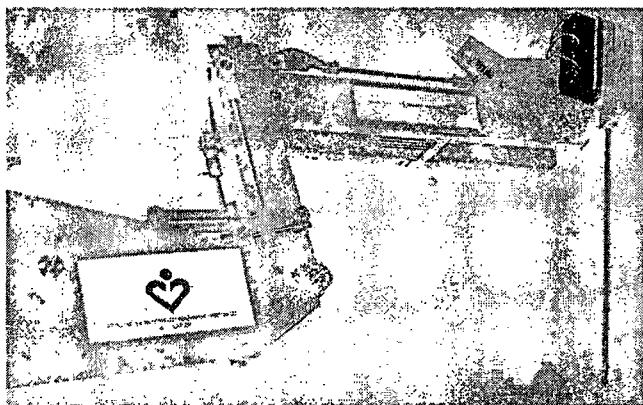
- zadajnik, mechaniczny interfejs użytkownika
- część wysięgnikowa,
- zespół napędowy kiści wraz z szybkozłączką oddzielającą od głównego robota narzędzie podlegające wymianie i sterylizacji
- narzędzie wyposażone w kiść o od jednego do czterech stopni swobody ( wtedy jeden stopień swobody nadmiarowy) i końcówki funkcjonalne.
- półautomatyczne narzędzia specjalne

Zgodnie z założeniami telemanipulator kardiochirurgiczny opracowany w ramach projektu badawczego składa się z dwóch ramion narzędziowych i jednego trzymającego kamerę. Każde ramię robota powinno mieć 3 stopnie swobody (2 obroty i jeden przesuw). Do ostatniego stopnia swobody przymocowane jest narzędzie ze swym układem napędowym lub kamera. Narzędzie składa się z kiści i końcówki roboczej (chwytak, nożyczki, skalpel itp.) umieszczonych na czterdziestocentymetrowym przecie. Układ przeniesienia napędu kiści musi umożliwić wymianę narzędzi w czasie operacji. Ze względu na strukturę kinematyczną manipulatora można wyszczególnić dwie części mechaniczne: ramię –układ kinematyczny pozycjonowania oraz kiść – układ kinematyczny zmiany orientacji końcówki. Ramię manipulatora ma zapewnić możliwość pracy i przemieszczania końcówki roboczej narzędzia wprowadzanego do ciała pacjenta przez mały otwór (port). Zasadniczo są trzy metody realizacji stałopunktowości: kinematyczna (da Vinci, RobIn Heart), pasywna (**Zeus**) i **aktywna**. Jedną z podstawowych cech kiści decydującą o wielu dalszych krokach konstrukcyjnych jest sposób przeniesienia napędu do tych stopni swobody, które znajdują się na końcu narzędzia. Istnieją zasadniczo dwie możliwości: napęd ciągnowy (da Vinci) i popychaczowy (ZEUS). W układach z napędem ciągnowym można znacznie zwiększyć liczbę stopni swobody (DOF) i zakres ruchu (zwykle  $\pm 90^\circ$ ) dla każdego przegubu. Podstawową trudnością jest jednak trwałość ciągnię [5].

#### 3.1 Konstrukcja telemanipulatora ROBIN HEART – przedprototyp

W ramach projektu badawczego zostało zbudowane przedprototypowe ramię narzędziowe robota RobIn Heart. Ramię to ma schemat kinematyczny realizujący ruchy składowe w kulistym układzie współrzędnych, czyli realizuje kinematyczną stałopunktowość (Rys.2). Pierwszy stopień swobody (DOF) napędzany jest za pomocą silnika bezszczotkowego zintegrowanego z przekładnią Harmonic Drive. Drugi i trzeci DOF napędzane są za pomocą silników bezszczotkowych, śrub tocnych oraz układu ciągnię. W celu zwiększenia zakresu ruchu na drugim stopniu swobody do 150 stopni zastosowano zdwojony układ równoległowodów. Mechanizm wysuwu narzędzia – trzeci stopień swobody jest również realizowany z użyciem równoległowodów, co eliminuje konieczność stosowania długiej (około 0,5 metra) i zawadzającej podczas operacji prowadnicy liniowej [6]. Zaprojektowana część orientacyjna robota składa się z trzech członów ruchomych, połączonych trzema przegubami obrotowymi. Całość, o długości około 25 milimetrów napędzana jest mechanizmem ciągnowym, w którym ciągnię są przewijane przez krążki. Ciągnowy układ napędowy umożliwia zmniejszenie

wymiarów końcówki manipulatora oraz utworzenie długiej (około 50 cm) części prowadzącej o małej średnicy. W projektowanej konstrukcji cięgna znajdują się tylko w części odłączanej, co w przypadku zerwania cięgna nie powoduje awarii całego robota. Po wymianie segmentu narzędziowego można kontynuować operację.

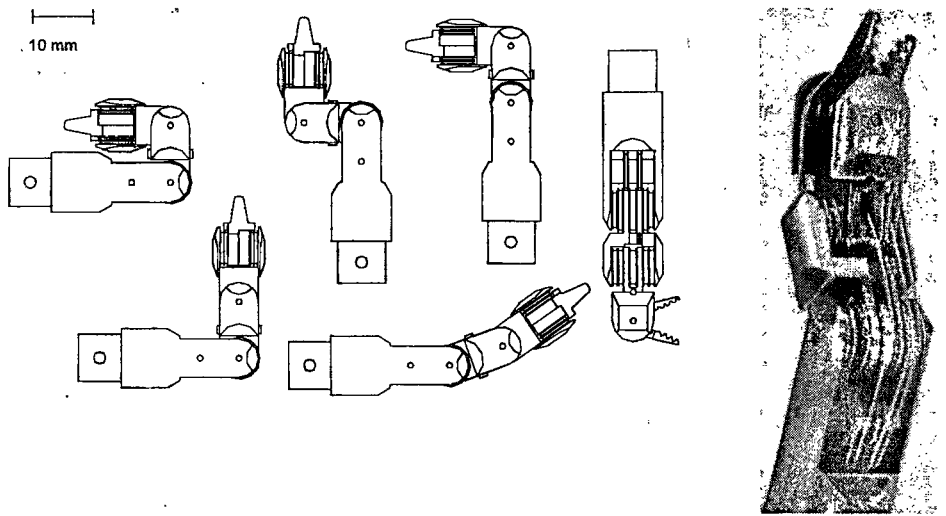


Rysunek 2. Schemat ramienia narzędziowego przedprototypu robota RobIn Heart.

W części napędowej kiści zastosowano pięć niezależnych napędów. Daje to następujące możliwości ruchowe: 3 stopnie swobody zapewniają dowolną orientację w przestrzeni, czwarty otwieranie i zamykanie szczęk narzędzia natomiast piąty (zwany łokciem) jest nadmiarowy i umożliwia zwiększenie możliwości manewrowych, omijanie przeszkód oraz pracę „do tyłu”. Do napędu zastosowano serwomechanizmy z silnikami prądu stałego oraz przekładnie bezluzowe.

Aby zapewnić możliwość sterylizacji manipulatora została zaprojektowana konstrukcja umożliwiająca szybkie i nieskomplikowane rozłączenie członu napędowego kiści od członu manipulacyjnego. Odłączona część manipulacyjna nie zawiera żadnych elementów wymagających smarowania. Przedstawiona część napędowa kiści ma niestety dość duże wymiary, co wynika w dużej mierze z wielkości serwonapędów. Aktualnie została jednakże zaprojektowana również część napędowa o znacznie mniejszych wymiarach (dwukrotnie w każdą stronę). W wersji docelowej ramię manipulatora będzie również znacznie mniejsze i lepiej dostosowane do potrzeb sali operacyjnej.

Jednym z podstawowych problemów jest dobór cięgien, które między innymi winne posiadać średnicę mniejszą niż 0,3 mm dla obciążenia nominalnego ok. 100 N. Tak wysokie obciążenie nominalne wynika z konieczności sztywnego trzymania igły podczas szycia. Siły wbijające igłę są zbliżone do 2N. Zakładając współczynnik tarcia 0.1 otrzymujemy niezbędną siłę nacisku 10N. Po uwzględnieniu przełożenia 5 i współczynnika bezpieczeństwa 2 (uwzględniającego pewność chwytu) minimalna siła w cięgnie wynosi 100N [6].



Rysunek 3. Możliwości manipulacyjne kiści.

Zaletą zaproponowanej konstrukcji (nadmiarowej) są jej zwiększone możliwości manipulacyjne: możliwa jest do osiągnięcia każda orientacja narzędzia (Rys. 3.). Jest to jednak okupione zwiększoną długością i średnicą kiści. W celu uzyskania dużej dokładności zastosowano do napędu kiści serwomechanizmy z silnikami prądu stałego oraz przekładnie bezluzowe. Aby zapewnić możliwość sterylizacji manipulatora została zaprojektowana konstrukcja umożliwiająca szybkie i nieskomplikowane rozłączenie członu napędowego kiści od członu manipulacyjnego. Odłączona część manipulacyjna nie zawiera żadnych elementów wymagających smarowania. Jako część wysięgnikową przewidziano dwa równoległowodny połączone ze sobą tak aby uzyskać ruchy obrotowe wokół jednego punktu stanowiącego wejście narzędzia do ciała pacjenta. Ruchy, które są zrealizowane przez część wysięgnikową to: 2 ruchy obrotowe oraz 1 ruch liniowy [5].

### 3.2 Moduł sterowania systemu telemanipulatora

Idea systemu sterowania, przyjęta w prowadzonym projekcie jest wspólna dla kilku proponowanych i testowanych rozwiązań technicznych. System pracuje w układzie manipulatora Master-Slave. Podstawowym zadaniem modułu sterowania, systemu pracującego w tej konfiguracji jest mapowanie ruchów operatora chirurga (zadajnika położenia/prędkości/przyspieszenia i ew. innych wielkości fizycznych) na ruch ramienia wykonawczego, poprzez wypracowywanie odpowiednich sygnałów sterujących dla jego napędów.

**Podstawowe założenia systemu sterowania telemanipulatora:**

- Zapewnienie odpowiednio dużej wartości częstotliwości odświeżania w głównej pętli programu sterującego -  $F_s$ , wymaganej dla płynnej pracy ramienia wykonawczego podczas mapowania ruchów zadajnika operatora (wstępnie założono  $F_s = 1$  [kHz]).
- Uzyskanie minimalnego, możliwego do zaakceptowania opóźnienia między ruchem zadajnika Master a ramieniem wykonawczym Slave -  $T_{DEL MIN}$ .

- Zapewnienie wymaganej dokładności i rozdzielczości mapowania ruchów,
- Implementacja skalowania wielkości zadanej, celem zwiększenia dokładności manipulowania oraz komfortu pracy, eliminacja efektu drżenia rąk operatora,
- Eliminacja efektu ruchów „lustrzanych” – kierunek ruchów narzędzia na zewnątrz ciała pacjenta jest odwrotny do kierunku ruchu końcówek wewnątrz ciała – układ sterujący powinien to wyeliminować zapewniając zgodność kierunku ruchów chirurga z ruchami końcówki narzędzia obserwowanymi przez niego na monitorze.
- Programowo/sprzętowa kontrola przekroczenia limitów ruchu dla danych osi.
- Zapewnienie komunikacji z modułem sterowania z poziomu komputera PC poprzez łącze RS lub Ethernet, w celu wprowadzania parametrów pracy oraz monitorowania istotnych wielkości obrazujących aktualny stan urządzenia.
- Opcjonalnie wprowadzenie pętli sprzężenia zwrotnego Force Feedback z możliwością skalowania zwrotnych odczuć siłowych (względnie innych np. audio-wizualnych, termicznych, wibracyjnych) przekazywanych operatorowi.
- Opcjonalnie planowana jest implementacja programowa zespołów ruchów realizujących podstawowe procedury chirurgiczne w trybie pracy półautomatycznej – nadzorowanej przez operatora.

### **3.2.1. Rozwiązania techniczne modułu sterowania systemem robota kardiochirurgicznego RobInHeart®**

#### **A) System bazujący na komputerze przemysłowym PEP Modular Computers®.**

W układzie zastosowano system bazujący na magistrali standardu VME (VersaModule Eurocard), sprawdzony w zastosowaniach komercyjnych (przemysłowych, medycznych i militarnych) z kartą główną VM62 na procesorze Motorola MC68060, pracujący w systemie czasu rzeczywistego OS9. System wyposażony jest w specjalizowane karty przeznaczone do sterowania napędami. Specjalizowane karty pozycyjne (VIMC) pełnią funkcję regulatorów PID, realizowanych na bazie procesorów LM628, pracujących z  $f=8$  [MHz], wyposażonych w 12 bitowy przetwornik D/A oraz zespół wyjść/wejść cyfrowych ogólnego przeznaczenia. Karty liczników, pracujące w trybie obsługi sygnałów z koderów przyrostowych stanowią interfejs modułu sterowania od strony zadajnika.

#### **B) System na bazie mikroprocesorów jednoukładowych i sygnałowych (DSP) typu RISC, specjalizowanych do sterowania napędów.**

Niezwykle szybki rozwój zarówno technologiczny jak i koncepcyjny mikroprocesorów, spowodował znaczny spadek cen specjalizowanych układów o bardzo wysokich parametrach. Pojawienie się na rynku w przystępnej cenie jednostek o dużych mocach obliczeniowych wraz z układami specjalizowanymi do sterowania napędami, umożliwiło budowę systemu sterowania telemanipulatora chirurgicznego. Struktura systemu sterowania na bazie mikroprocesorów jednoukładowych i sygnałowych (DSP).

Procesor sygnałowy (testowane rozwiązania: Sharc ADSP-2106x Analog Device® oraz TMS 320xxx Texas Instruments®) stanowi jednostkę centralną systemu, której zadaniem jest przeprowadzanie obliczeń związanych ze skalowaniem, rozwiązaniem



równań kinematyki, podziałem i synchronizacją zadań. System wyposażony jest w zestaw  $-N$  zaprojektowanych i uruchomionych modułów sterujących dla danej osi, wyposażony w regulator (specjalizowany procesor jednoukładowy PIC<sub>xxx</sub> Microchip®), przetwornik 10/12 bit. D/A oraz sterownik mocy. Zadajnik teleoperatora podłączany jest do systemu przez układ  $-M$  modułów sprzęgających, przesyłających informację z enkoderów drążka manipulacyjnego do systemu.

Niewątpliwą zaletą proponowany układu, będącego aktualnie w fazie testów, jest elastyczność i rozwojowość systemu. Dzięki zapewnionej przez producentów „zgodności wstecz”, pozwala to na przenoszenie opracowanych algorytmów na pojawiające się nowe jednostki. Dostępne już teraz układy posiadają moc obliczeniową wymaganą dla stabilnej pracy systemu. Środowiska programowe dedykowane poszczególnym układom, pozwalają na implementację algorytmu sterowania w przyjaznych użytkownikowi warunkach. Koszty finansowe związane ze stosowaniem specjalizowanych układów są relatywnie wysokie jedynie w początkowej fazie realizacji projektu, przy zakupie narzędzi programowych.

### 3.3 Dalsze kierunki prac

Na obecnym etapie prac wykonano projekty wszystkich części telemanipulatora oraz odpowiednie modele i przedprototyp. Przedprototyp został poddany szczegółowym badaniom technicznym. W wyniku badań stwierdzono, że jego konstrukcja jest znacznie mniej sztywna, niż wynikało to z obliczeń numerycznych. Różnice wynikają przede wszystkim z faktu, że obliczenia numeryczne nie uwzględniały podatności łożysk oraz pasowań w miejscach osadzenia zarówno łożysk jak i wałów. Dodatkowym źródłem podatności jest ażurowa konstrukcja napędu ruchu liniowego oraz otwarty korpus pierwszego członu – tzw. gondoli. Wysoka podatność całego ramienia przedprototypu w połączeniu z dużą masą bloku napędowego (2 kg) spowodowała bardzo niskie częstotliwości drgań własnych ramienia (rzędu kilku Hz). Kolejną niedogodnością analizowanej konstrukcji okazało się zastosowanie długich cięgien do napędu kiści. Powodowało to podatność a w konsekwencji znaczną histerezę układu przeniesienia napędu. Działanie przedprototypu było również konsultowane z chirurgami. Stwierdzili oni wysoką funkcjonalność zastosowanej konstrukcji kiści. Zgodnie z ich opinią zrealizowane w przedprototypie zakresy ruchów znacznie przekraczają zakresy niezbędne do przeprowadzania operacji kardiochirurgicznych. Na drugim stopniu swobody wystarczy zakres ruchu  $80^\circ$  (zamiast  $150^\circ$  zastosowanych w przedprototypie) a zakres ruchu stopnia liniowego można ograniczyć do 0,3 m (zamiast 0,4 m). Bazując na analizie rozwiązania przedprototypu zaprojektowano docelowe rozwiązanie ramienia narzędziowego robota RobIn Heart. Zmiany w konstrukcji zmierzały w trzech kierunkach: zmniejszenia masy zespołu napędowego kiści, zwiększeniu sztywności ramienia i układów przeniesienia napędu, oraz zmniejszeniu jego gabarytów, zwłaszcza w kierunku poprzecznym.

Zmniejszenie masy zespołu napędowego kiści zostało osiągnięte przez zastosowanie zamiast serwomechanizmów modelarskich znacznie mniejszych silników bezszczotkowych o średnicy 6 mm wyposażonych w przekładnie planetarne. Dzięki temu cały blok napędowy kiści wraz z zespołem przeniesienia napędu umieszczonym w górnej części narzędzia ma wymiary 46 x 48 x 90 mm. Masa tych części będzie wynosiła około 0,4 kg, czyli pięciokrotnie mniej niż dotychczas.

Zwiększenie sztywności ramienia osiągnięto poprzez zastosowanie zamkniętych profili wszystkich elementów ramienia oraz przez zastosowanie większych i sztywniejszych łożysk z dobrze dobranym naprężeniem wstępnym. Zmieniono konstrukcję napędu liniowego zastępując układ przegubowy systemem z prowadnicami liniowymi i, skracając układ przeniesienia napędu tego stopnia swobody. Poprawiono również własności użytkowe kiści przez zmodyfikowanie jej układu przeniesienia napędu. Dzięki ograniczeniu zakresu ruchu na drugim stopniu swobody do  $120^\circ$  uproszczono strukturę układu równoległowodów, co w konsekwencji doprowadziło do dużej zwartości konstrukcji. Szerokość ramienia wynosi od 46 do 68 mm w jego różnych fragmentach.

Dodatkowymi atutami nowej konstrukcji są: znacznie lepsza dostępność do poszczególnych elementów, większa łatwość montażu i demontażu oraz możliwość poprowadzenia okablowania w sposób estetyczny i nie ograniczający swobody ruchu ramienia.

W ramach dalszych prac będzie podjęta próba zaprojektowania tzw. "scyzoryka", czyli uniwersalnej końcówki posiadającej więcej niż jedno narzędzie. "Scyzoryk" taki posiadający np. szczypce, nożyczki i skalpel, ułatwiłby pracę chirurgowi, eliminując zbędne oczekiwanie na wymianę narzędzia. Podstawowym problemem jest mały rozmiar kiści utrudniający pomieszczenie wszystkich elementów mocujących i napędowych.

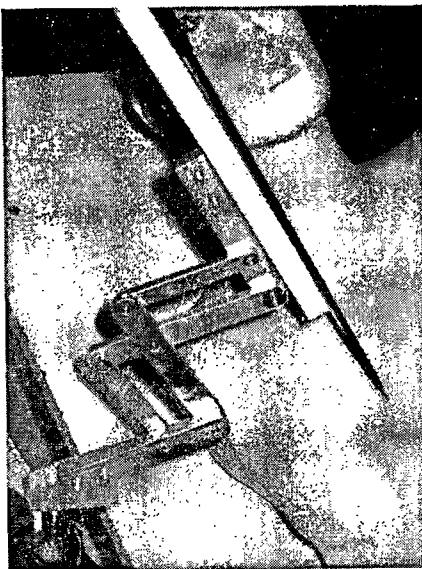
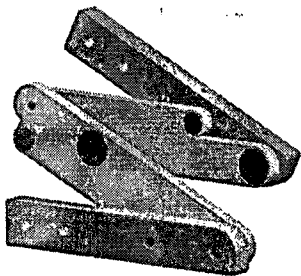
### 3.1 Od studium konstrukcyjnego układów kinematycznych manipulatorów do nowego projektu ramienia

W ramach projektu opracowano kilka projektów i wykonano wybrane prototypy manipulatorów specjalnych dedykowanych zastosowaniom do prowadzenia operacji chirurgicznych. Zawierają one w swojej konstrukcji płaskie mechanizmy równoległowodowe o specjalnych właściwościach zapewniające przestawienie (w płaszczyźnie ruchu) osi obrotu członu wyjściowego względem wejściowego. Oznacza to, że możliwa jest realizacja obrotu członu wyjściowego takiego mechanizmu względem osi (geometrycznej) związanej z członem wejściowym ale nie należącej do żadnego elementu mechanizmu lecz ulokowanej zupełnie poza jego obrębem. Mechanizmy takie są szczególnie przydatne w konstrukcji manipulatorów robotów chirurgicznych, gdyż pozwalają one obracać elementem wysięgnikowym narzędzia laparoskopowego (którego ruch zapewnia jednocześnie ruch roboczy końcówki wewnątrz ciała pacjenta) względem punktu charakterystycznego związanego z portem laparoskopowym, przy czym nie zachodzą kolizje między manipulatorem z narzędziem a powłokami ciała pacjenta, podczas gdy konstrukcja jest zwarta i obejmuje stosunkowo mały obszar przestrzeni. Uzyskano zwiększenie sztywności ramienia i układów przeniesienia napędu, oraz zmniejszenie jego gabarytów, zwłaszcza w kierunku poprzecznym. Uzyskanie takich właściwości jest możliwe dzięki zastosowaniu zdwojonych mechanizmów równoległowodowych sprzęgniętych kinematycznie. Warto nadmienić, że mechanizmy równoległowodowe pozwalają na realizację ruchu członu wyjściowego jako ruchu translacyjnego po okręgu. Powoduje to możliwość ekwidystalnego przeniesienia tego ruchu na dowolną odległość i w dowolnym kierunku od punktów rzeczywistego obrotu na korbach mocujących. Oczywiście każdy punkt członu wyjściowego posiada swój własny bezwzględnie stały środek obrotu. Taka

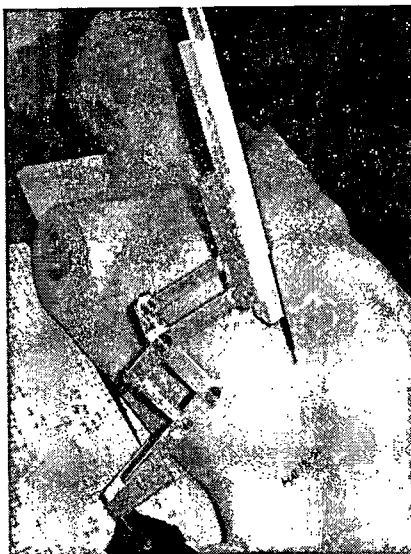
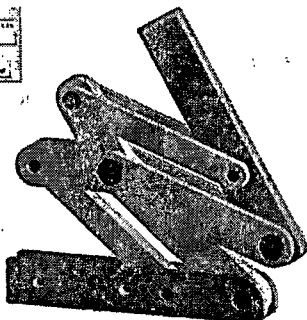
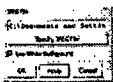
własność pojedynczego równoległowodów poprzez odpowiednie sprzężenie go z drugim równoległowodem zamocowanym na końcu pierwszego pozwala na zbudowanie mechanizmów specjalnych, o osi obrotu członu wyjściowego ułożonej poza mechanizmem. Tak więc mechanizmy równoległowodowe pozwalają przesunąć (offsetować) chwilowe osie obrotu wybranych członów i ustalić je w przestrzeni względem innych wskazanych członów składowych, np. członu podstawy i członu wyjściowego. Połączenie takiego mechanizmu z szeregowo połączonym mechanizmem obrotu ułożonym na podstawie pozwala na uzyskanie mechanizmu sferycznego, w którym punkty członu wyjściowego poruszają się po współśrodkowych powierzchniach sferycznych. Dodając na członie wyjściowym takiego układu mechanizm prostoliniowy poruszający się na kierunku promieniowym względem punktu centralnego uzyskuje się w efekcie mechanizm kulisty pozwalający na przemieszczanie członu wyjściowego odtwarzającego bezpośrednio współrzędne kulistego układu współrzędnych. Zaletą rozwiązania jest zwarta konstrukcja, mała wielkość zajmowanej przestrzeni i wysoka sztywność. Mechanizm takiego manipulatora stanowi więc układ kinematyczny o kulistym ruchu punktu końcowego. Manipulator zbudowany według takiej zasady działania pozwala na wprowadzanie związanego z jego członem końcowym (wyjściowym) narzędzia laparoskopowego przez otwór portu do ciała pacjenta, przy czym punkt stały mechanizmu jest w trakcie ustawiania manipulatora na stanowisku operacyjnym sytuowany na przecięciu osi portu laparoskopowego z płaszczyzną powierzchni ciała pacjenta. Rozwiązania ramion charakteryzują się dużym zakresem ruchu obrotowego drugiego stopnia swobody.

Zwiększenie sztywności ramienia osiągnięto poprzez zastosowanie zamkniętych profili na wszystkie elementy ramienia oraz przez zastosowanie większych i sztywniejszych łożysk z dobrze dobranym napięciem wstępnym. Zmieniono konstrukcję napędu liniowego zastępując układ przegubowy systemem z prowadnicami liniowymi i skracając układ przeniesienia napędu tego stopnia swobody.

Na rys. 4. na tle fantomu pokazano własności funkcjonalne modelu mechanizmu stałopunktowego tzw. prostego. Zakres ruchu drugiego stopnia swobody wynosi  $140^\circ$ . Pierwsza oś obrotu mechanizmu (nie pokazana na zdjęciu) musi leżeć na podstawie mechanizmu w płaszczyźnie osi korb równoległowodów pierwszego. Powoduje to konieczność posiadania wydłużenia układu łożyskującego i znaczne powiększenie wymiarów przy obniżeniu sztywności. Natomiast zaletą jest prostota, bardzo niski koszt i łatwość wykonania oraz możliwość wykorzystania tego zespołu jako układu bazującego przy ręcznie prowadzonych operacjach laparoskopowych.



Rys. 4. Model mechanizmu stałopunktowego w wersji „prostej”: model wirtualny w stanie złożonym i prototyp



Rys. 5. Model mechanizmu stałopunktowego w wersji „odsadzonej”: model wirtualny w stanie złożonym i prototyp w położeniu środkowym

Na rys. 5. pokazano fragment drugiej wersji manipulatora zawierający drugi i trzeci stopień swobody. Mechanizm podwójnie równoległowodowy do realizacji obrotu drugiego stopnia swobody jest w tej wersji mechanizmem tzw. odsadzonym, jego korby są tutaj na przedłużeniu sprzęgającym odpowiednio zagięte. W tej wersji pierwsza oś

obrotu może zostać ulokowana na podstawie bezpośrednio w okolicy osi korb równoległowodów pierwszego, co znacznie zmniejsza obszar przestrzeni zajmowanej przez mechanizm. Również narzędzie można ulokować na członie wyjściowym w osi odsuniętej na zewnątrz. Mechanizm ten zapewnia znacznie większe odsunięcie układu mechanicznego manipulatora względem portu i w ten sposób pozwala na efektywniejsze wykorzystanie przestrzeni wokół pola operacyjnego.



Rys. 6. Model mechanizmu manipulatora stałopunktowego w wersji „kompaktowej”: mechanizm w stanie złożonym i w stanie rozłożonym

Doświadczenia zdobyte przy opracowywaniu i badaniach dwóch pierwszych wersji mechanizmów stałopunktowych zaowocowały opracowaniem tzw. wersji kompaktowej manipulatora pokazanej na rys. 6. Zasada działania jego mechanizmów jest identyczna jak opracowana w wersji drugiej z rys. 8. Natomiast w konstrukcji wykorzystano kompaktowe wersje modułowe mechanizmów równoległowodowych ulokowanych wewnątrz ściśle do nich dopasowanych członów, które mają tutaj postać rur prostokątnych zakończonych specjalnymi korpusami kształtowymi zawierającymi gniazda łożysk jednocześnie zamykające prześwity rur. Na zdjęciu jest pokazany, umieszczony na członie wyjściowym, opracowany wstępnie mechanizm prowadnicy prostoliniowej prowadzący narzędzie w kierunku promieniowym. Zaletą tego rozwiązania jest prosta, estetyczna, zwarta i szczelna konstrukcja o wysokiej funkcjonalności zapewniająca szeroki zakres realizowanych czynności operacyjnych. Aktualnie konstrukcja ta jest uzupełniana o kolejne elementy funkcyjne.

### 3. WNIOSKI

Świat medyczny jest już dzisiaj przygotowany do stosowania nowych narzędzi w chirurgii. Roboty - telemanipulatory są chętnie wykorzystywane jako mechaniczni asystenci kierujący kamerą endoskopową (ponad 100 tys. zastosowań). Coraz szersze jest pole zastosowań dla robotów operujących sterowanych przez chirurgów. Ich wprowadzenie przyniesie określone efekty ekonomiczne i umożliwi wykonanie teleoperacji, tj. zabiegów na odległość w sytuacjach takich jak wojna, epidemia, podróz kosmiczna, w których wystąpi brak fachowego personelu przy pacjencie. Roboty nowej generacji mogą spowodować skrócenie czasu zabiegu, jako pierwsze w historii narzędzie do wykonywania operacji stanowią środek umożliwiający wykonanie operacji

uprzednio zaplanowanej i przetrenowanej na stanowiskach symulacyjnych. Brak bezpośredniego kontaktu z ciałem pacjenta zmniejszy ryzyko utraty zdrowia z powodu infekcji ze strony personelu operującego.

W połowie 2003 roku planowane jest zakończenie pierwszego etapu prac badawczo-konstrukcyjnych nad polskim robotem RobIn Heart. Prototyp zostanie przetestowany w eksperymencie na zwierzętach. Jeśli wynik naszej dotychczasowej pracy zakończy się sukcesem, rozpoczniemy w najbliższych latach proces wdrażania klinicznego RobInHearta. Jako pierwsza na sali operacyjnej pojawi się kamera endowizyjna sterowana głosem.

### **Podziękowania**

Praca jest finansowana w ramach projektu badawczego KBN 8 T11E 001 18 oraz przez Fundację Rozwoju Kardiologii. Autorzy pracy dziękują wszystkim uczestnikom grantu, naukowcom i studentom, oraz konsultantom za wkład w realizację opisanego zadania.

### **LITERATURA**

- [1] Loulmet D, Carpentier A, d'Attellis N, Berrebi A, Cardon C, Ponzio O, Aupeple B, Relland JYM "Endoscopic coronary artery bypass grafting with the aid of robotic assisted instruments. The Journal of Thoracic Cardiovascular Surgery, July 1999
- [2] Falk V, Walther T, Autschbach R, Diegeler A, Battellini R, Mohr FW "Robot-assisted minimally invasive solo mitral valve operation." J Thorac Cardiovasc Surg 1998 Feb;115(2):470-1
- [3]. Nawrat Z. „Polski robot kardiologiczny; strategia rozwoju prac badawczo-konstrukcyjnych” *Symposium „Roboty Kardiologiczne 2000”* Zabrze, 12 grudnia 2000 r.
- [4] Nawrat Z., Religa Z. Perspektywy rozwoju zastosowania robotów w kardiologii. 217-225, Krajowa Konferencja Robotyki Wrocław 2001 (Łądek Zdrój) Wyd. Politechniki Wrocławskiej, 2001
- [5] Podędkowski L. Nawrat Z. "Konstrukcja przedprototypu i wybrane aspekty badań nad polskim robotem kardiologicznym RobIn Heart®" *Symposium Sekcji Podstaw Technologii Komitetu Budowy Maszyn Polskiej Akademii Nauk, Prace Naukowe Wydziału Mechanicznego Politechniki Łódzkiej, Zeszyt nr 71, Łódź 2002 r. str. 81-94.*
- [6] Kobierska A., Wróblewski P., Zawiasa P., Nawrat Z., Podędkowski L.. Propozycja konstrukcji ramienia narzędziowego polskiego robota kardiologicznego. Krajowa Konferencja Robotyki Wrocław 2001 (Łądek Zdrój), str 225-230, Wyd. Politechniki Wrocławskiej.