

Zbigniew Nawrat
Dr, dyr. naukowy IPS, Fundacji Rozwoju Kardiochirurgii w Zabrze,
adiunkt Śląska Akademia Medyczna
Krzysztof Mianowski
Dr, Adiunkt, Politechnika Warszawska
Leszek Podseǳkowski
Dr hab. inż., prof.PŁ, Politechnika Łódzka
Paweł Kostka
Dr adiunkt, Politechnika Śląska
Zbigniew Małota
mgr, Fundacji Rozwoju Kardiochirurgii w Zabrze
Piotr Wróblewski
Mgr inż., asystent, Politechnika Łódzka
Zbigniew Religa
Prof.dr hab., dyrektor, Instytut Kardiologii w Warszawie
Fundacja Rozwoju Kardiochirurgii

ROBIN HEART – EGZAMIN DOJRZAŁOŚCI

W ramach prowadzonego w latach 200-2003 przez Fundację Rozwoju Kardiochirurgii w Zabrze we współpracy ze specjalistami z Politechniki Łódzkiej i Warszawskiej projektu wykonano trzy wersje robota o nazwie Robin Heart. W artykule przedstawiony jest program prowadzonych badań oraz wybrane wyniki testów robotów.

THE ROBIN HEART – MATURE EXAM

Three version of telemanipulator for usage in cardiac surgery named Robin Heart, were performed as a result of project created by Foundation of Cardiac Surgery Development in Zabrze, Poland, in cooperation with specialists from the Technical University of Lodz and Warsaw University of Technology in period 200-2003. The programme of examinations and chosen test results of robots Robin Heart 0,1 and 2 are presented.

1. WSTĘP

Ocenia się, że na świecie wykonywanych jest corocznie około czterech milionów zabiegów metodą chirurgii minimalnie inwazyjnej. Gwałtowny rozwój mniej inwazyjnych technik chirurgicznych, które zastępują wiele zabiegów przeprowadzanych do tej pory metodami klasycznymi, jest wynikiem oczekiwań pacjentów i wymagań, jakie stawiają lekarze. Mniejsza inwazyjność polega na tym, że operacje przeprowadza się za pomocą specjalnych narzędzi wprowadzonych w obszar podlegający interwencji chirurgicznej przez niewielkie otwory w powłokach ciała pacjenta. Pacjenci poddani operacji mało inwazyjnej są mniej narażeni na ból, skracają się również czas rekonwalescencji a przy wsparciu innowacji technicznych i wzroście doświadczenia chirurga – również skracają się czas operowania.

Skuteczność prowadzenia takich zabiegów w znacznej mierze zależy od narzędzi. Wymagania jakie stawia metoda nie powinny zmniejszać precyzji operowania. Za najważniejsze (ze względu na liczbę pacjentów) zadanie nowoczesnej kardiologii uważa się operacje na bijącym sercu. Nie stosuje się wtedy traumatycznego dla krwi mechanicznego płuco-serca ale też wymagania co do precyzji i ruchliwości wprowadzonych w przestrzeń w pobliżu serca narzędzi są krytyczne. Robot chirurgiczny pokonał ograniczenia tradycyjnych przyrządów endoskopowych, które mają tylko cztery stopnie swobody (s.w.). Niektóre ze stosowanych narzędzi wykonawczych robotów mają obecnie 5-6 s.w. Roboty mają wymienne narzędzia stosowane w zależności od potrzeb – noże harmoniczne, kleszczyki itp.. Tak zwane szybkołączące powinno umożliwić szybką wymianę narzędzia przez asystenta oraz zapewnić możliwość sterylnego połączenia „czystego” narzędzia ze stałym ramieniem robota. Połączenie dwóch konsol sterowniczych robotów pozwala również na wprowadzenie rewolucji w dziedzinie szkolenia chirurgów. Ciągłe jednak, a być może zawsze, sukces operacji będzie zależał od chirurga – jego sprawności, wiedzy, wyobraźni, doświadczenia. W obecnie stosowanych urządzeniach wspomagających chirurgów sprzężenie siłowe zwrotne od narzędzi do dłoni chirurga nie jest wystarczające. Pionierzy zrobotyzowanej kardiologii twierdzą, że posiadanie obrazu wysokiej rozdzielczości powoduje, że brak dotykowego sprzężenia zwrotnego nie wpływa znacznie na jakość operowania. Nawet używanie zwykłych manualnych narzędzi stosowanych podczas operacji „na otwarto” zniekształca bowiem również odczucie dotyku.

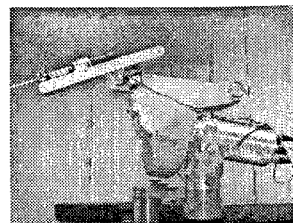
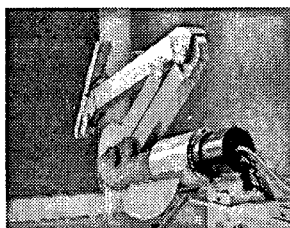
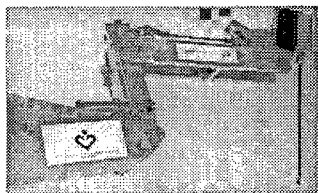
Można wymienić następujące typy zrobotyzowanych systemów, które są stosowane w chirurgii:

- roboty zastępujące asystenta w czasie operacji, np. zrobotyzowane ramię dla kamery endowizyjnej AESOP(Computer Motion, USA).
- roboty chirurgiczne. Telemanipulatory wyposażone w precyzyjne narzędzia są stosowane z coraz większym powodzeniem w wielu dziedzinach chirurgii. Jako, że stanowią równocześnie systemy telechirurgiczne, umożliwiają wykonywanie operacji na odległość. W tej chwili stosowane są klinicznie amerykańskie roboty da Vinci i Zeus (produkowane przez zjednoczone firmy Intuitive Surgical i Computer Motion). W Polsce powstały dwa prototypowe roboty pod wspólną nazwą *RobIn Heart*.
- roboty nawigacyjne (bierne) - służą do dokładnego pozycjonowania i utrzymują prawidłowy tor narzędzia np. *NeuroMate (Integrated Surgical Systems, USA)*
- roboty pracujące jako narzędzia wykonawcze w systemie odwzorowania trajektorii określone podczas planowania przedoperacyjnego (nawigacyjne czynne) np.: *Robodoc (Integrated Surgical Systems, USA)*.

Roboty operujące Zeus (firmy CMI) i da Vinci (firmy IS) od 1998 pracują na niespełna 300 salach kardiologicznych na świecie. Można szacować, że do dziś kilka tysięcy operacji na sercu wykonano z pomocą robotów. Najpopularniejszy asystent-robot – AESOP – jest stosowany również, około 300 razy, od kilku lat w Katedrze Kardiologii Katowicach, głównie w czasie pobierania tętnicy piersiowej. W roku 2002 zastosowano wypożyczonego robota Zeus (tego samego, który był użyty do pierwszej w świecie transatlantycznej teleoperacji) do wykonania elementów operacji pomostowania naczyń wieńcowych.

2. POLSKI ROBOT *RobIn Heart*

Prace nad polskim robotem *RobIn Heart* finansowane przez Komitet Badań Naukowych i Fundację Rozwoju Kardiologii w Zabrze 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. 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 wykorzystywać program doradczy. Opracowywano kilka modeli zadajników ruchu wykorzystujących różne możliwości i doświadczenie operatorów. Jest wśród nich rozwiązanie wykorzystujące typowy uchwyt laparoskopu jako drążek 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 wszczepienia komór wspomaganie serca. Przeprowadzenie takiej operacji na zwierzęciu jest planowane na rok 2004. Co rocznie uczestnicy projektu prezentują swoje postępy na konferencjach w FRK w Zabrzu. Na Konferencji Roboty Kardiologiczne 2003 w Zabrzu 18 listopada przedstawiono trzy rozwiązania: *RobIn Heart 0*, *RobIn Heart 1* oraz *RobIn Heart 2*.



Rys. 1. Ramię robota
RobIn Heart 0

RobIn Heart 1

RobIn Heart 1

Zgodnie z założeniami telemanipulator kardiologiczny 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 czterdziesto-centymetrowym pręcie. 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 (s.s.) i zakres ruchu (zwykle $\pm 90^\circ$) dla każdego przegubu. Narzędzia mają postać długiej (około 40 cm) tulei o średnicy - da Vinci ϕ 8.5 mm zakończonej kiścią (3 stopni swobody s.s.), - Zeus ϕ 3.9 mm, kiść (2 s.s.) lub 4.9 mm (3 s.s.), - RobIn Heart 0 ϕ 10 mm, RobIn Heart 1 ϕ 8 mm, kiść (3 DOF), poddawany jest testom "syczoryk" posiadający szczypce i nożyczki. RobIn Heart posiada obecnie rozwijane dwa systemy sterowania: system bazujący na komputerze przemysłowym PEP Modular Computers® oraz system na bazie mikroprocesorów jednoukładowych i sygnałowych (DSP) typu RISC, specjalizowanych do sterowania napędów (zbliżony charakterem do rozwiązania w Zeus i da Vinci). Również zagadnienie rodzaju konsoli sterowniczej i interfejs użytkownika został rozwiązany różnie rozwiązany i podlega modyfikacjom. Celem prowadzonych prac jest aby użytkownicy RobIn Heart'a mieli możliwość zamówienia najwygodniejszego dla siebie i najbardziej adekwatnego do wykonywanych zadań interfejsu mechanicznego użytkownika. W Fundacji Rozwoju Kardiochirurgii w Zabrze przygotowywane są odpowiednie stanowiska treningowe dla lekarzy.

3. TESTY ROBOTA CHIRURGICZNEGO

Program badawczy obejmuje szereg doświadczeń, w których badana jest funkcjonalność całego urządzenia oraz poddawane są różnym testom elementy systemu. Część badań robota RobIn Heart (RH) ma charakter klasycznych badań teleoperatorów oraz urządzeń techniki medycznej. Określenie wymagań testowych opiera się na wynikach obserwacji i badań oddziaływania narzędzi chirurgicznych z tkankami podczas operowania. Ostatnie elementy programu badawczego, po usunięciu wszelkich wad układu elektromechanicznego i sterowania systemem, stanowią testy na zwierzętach w warunkach sali operacyjnej oraz eksperymenty kliniczne.

Wśród badań elementów robota najistotniejsze znaczenie miały testy linek dla układu przekazania napędu do końcówki narzędziowej. Po wielu badaniach wybrano do układu ciągnowego RH0 linkę wolframową. Wykonano badania na zrywarce : wytrzymałość linki na zrywanie wyniosła średnio 18 kg. W związku z charakterem pracy linki poddano ją okresowemu obciążeniu na wałku z częstotliwością $F = 90$ [cykli/min], gdzie: 1 cykl pomiarowy oznacza 2 pełne obroty wałka (2×16.5 [mm]) wykonane w przeciwnych kierunkach. Przykładowo przy obciążeniu 2×0.57 [kg] (odważniki zawieszono symetrycznie na dwóch końcach linki) uzyskano maksymalny czas

działania do 28 000 cykli. Niestety w praktyce do dzisiaj linka jest najbardziej awaryjną częścią robota i trwają poszukiwania lepszego materiału.

Badania funkcjonalności robota i poszukiwania racjonalnych technik operowania są wykonywane również z pomocą konsultantów medycznych (znakomitych chirurgów należących do zespołu) oraz studentów koła naukowego złożonego ze studentów medycyny, fizyki medycznej i różnych kierunków politechnicznych. W czasie organizowanych warsztatów między innymi wykonywany jest szereg chirurgicznych ćwiczeń sprawnościowych porównując wykonanie tej samej czynności przy pomocy różnych narzędzi.

Część z badań projektowych można wykonać wykorzystując metody modelowania. Modelowanie jako metoda poznawcza odgrywa szczególnie istotną rolę w naukach medycznych, gdzie metoda eksperymentu fizycznego jest trudna do zrealizowania z powodu ingerencji w obiekt żywy i z powodów etycznych. Modelowanie tkanek czyli obiektu na którym wykonywana jest operacja ma znaczenie dwojakie w naszym projekcie:

1. Określenie założeń dla konstrukcji i sterowania robota. Określenie założeń konstrukcyjnych związane jest z charakterystycznymi cechami operacji małoinwazyjnym oraz wymaganiami funkcjonalnymi dotyczącymi operowania. Przeprowadzona na wstępie analiza dynamometryczna czynności charakterystycznych dla operacji kardiochirurgicznych

Celem naszych doświadczeń było oszacowanie sił potrzebnych na wykonanie podstawowych czynności chirurgicznych podczas operacji kardiochirurgicznej. Przedmiotem badań były świeże serca świnięskie. Badania dostarczyły podstawowych informacji o tym, jakie minimalne siły muszą być zaaplikowane przez końcówkę wykonawczą przyrządu chirurgicznego, aby mogły zostać wykonane podstawowe czynności chirurgiczne tj.

- przebicie tkanki igłą chirurgiczną (zszywanie),
- przecięcie tkanki skalpelem lub nożyczkami,
- zaciągnięcie węzła chirurgicznego.

Z wymienionych badań ze stałą prędkością największe obciążenia były związane z nacinaniem mięśnia serca skalpelem – 18 N.

2. Standaryzowanie testów robota. W tym celu dążymy do zastąpienia operowania na tkankach naturalnych poprzez „operowanie” na substytutach, modelach tkanek. Konstruujemy układ elektromechaniczny złożony z dynamometru i sterowanych komputerem silników krokowych, który symuluje zachowanie tkanki: pod odpowiednią siłą poddaje się oddziaływaniu siły reakcji.

Modele tkanek miękkich zbudowane na podstawie analizy szeregu danych doświadczalnych stanowią podstawę do tworzenia algorytmów sterowania urządzeniem symulującym reakcję z tkanką naturalną. Obecnie testowane do tego celu jest urządzenie z jednym stopniem swobody. Prowadzone są prace nad uruchomieniem eksperymentów z układem trzech stopni swobody o strukturze kartezjańskiej.

Procedura testu robota:

1. końcówka robota zostaje przymocowana do obiektu modelowego (lub przy próbach zderzeniowych jedynie się styka z obiektem modelowym) – Rys.2
2. definiujemy określony charakter obiektu modelowego np. aorta i wpisujemy odpowiednią procedurę
3. precyzujemy odpowiednie zadania dla robota np. przekłuj igłą obiekt
4. analizujemy wyniki testu



Rys. 2. Test jednosioyowy
RobIn'a 0

Dzięki takiej procedurze można porównywać roboty i testować różne elementy robota: układ sterowania, drgania układów mechanicznych, precyzję i sprawność narzędzi, działanie układu sprzężenia zwrotnego. Najistotniejszą zaletą takiego postępowania jest standaryzacja testu, która umożliwi adekwatne porównywanie uzyskiwanych wyników.

3.1 Testy układu mechanicznego

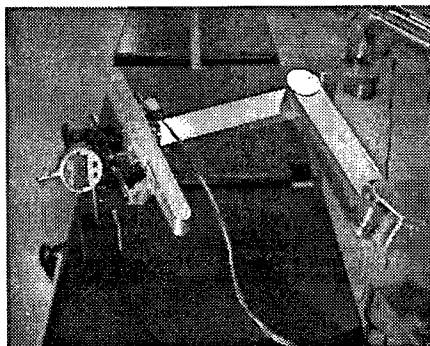
Układ wykonawczy robota RH stanowi pewna liczba (aktualnie 3, w przyszłości więcej) manipulatorów z zamocowanymi obrazowodami/narzędziami, są one sterowane sygnałami z komputerowego układu sterowania dla którego sygnały sterujące generuje lekarz operator z wykorzystaniem tzw. zadajników. Mamy tutaj do czynienia z systemem człowiek-maszyna którego zadaniem jest wykonywanie precyzyjnych zabiegów operacyjnych w określonym czasie. Dla zapewnienia wysokiej jakości realizowanych zadań własności ogólne systemu muszą być bardzo wysokie. Człowiek jako element systemu może się np. okazać czasami elementem zawodnym systemu. Podstawowym celem mechanicznego systemu szczytującego, komputerowego systemu sterowania, mechanicznego układu nośnego manipulatorów i zawieszonych na nim narzędzi jest jakościowa i ilościowa poprawa charakterystyk kinematycznych i dynamicznych na poziom niezbędny dla wysokiej jakości prowadzonej operacji w stosunku do operacji klasycznej w której lekarz trzyma w rękę skalpel, nożyczki, igłę. O jakości zabiegów operacyjnych decydują własności ogólne całego systemu, które można określić na drodze doświadczalnej (najprostszym sposobem w wypadku systemu wdrożonego do praktyki medycznej jest wykonanie fragmentu operacji przez lekarza i jego opinia na ten temat). O własnościach sumarycznych systemu decydują własności jego elementów składowych. Projektant, konstruktor typuje proponowane rozwiązania

wybierając je z katalogów i po wykonaniu i zmontowaniu na warsztacie musi ocenić rzeczywiste jego charakterystyki.

Jako układy mechaniczne napędzane elektrycznie systemy takie charakteryzują się pewnymi właściwościami które mają istotny wpływ

Badania układu mechanicznego manipulatorów obejmują:

1. badania sztywności manipulatora z narzędziem na końcówce narzędzia
2. badania powtarzalności pozycjonowania końcówki przy różnych konfiguracjach ramienia na wytypowanych kierunkach w przestrzeni
3. badania osiągalnych sił oddziaływania końcówki narzędzia na otoczenie
4. badania osiągalnych prędkości końcówki przy różnych konfiguracjach ramienia na wytypowanych kierunkach w przestrzeni
5. badania dokładności bezwzględnej położenia końcówki w układzie związanym z podstawą manipulatora
6. badania histerezy położenia końcówki narzędzia w funkcji sygnału sterującego



Rys. 3. Badania robota RobIn Heart 2

Na rys 3. pokazano czujnik elektromechaniczny o rozdzielczości 0.001 mm mechanicznie sprzężony z końcówką manipulatora. Czujnik mierzy przemieszczenia na kierunku drugiego stopnia swobody (poprzecznie). Badania miały na celu określenie dokładności i powtarzalności pozycjonowania na tym kierunku. W trakcie badań robot wykonywał w sposób automatyczny programowane ruchy cykliczne o zadanej amplitudzie i trapezowym profilu prędkości. na określonym kierunku. Rejestrowano bezwzględne wartości wskazań położenia czujnika odpowiadające w kolejnych cyklach pozycjonowania kolejnym położeniom ramienia. Uzyskane wyniki opracowano statystycznie i uzyskano szacowane wartości dokładności bezwzględnej i powtarzalności pozycjonowania.

Badania doświadczalne przeprowadzone na fragmencie robota zwierające manipulatory RH2 potwierdziły wysokie własności konstrukcji mechanicznej jak niski poziom tarcia, relatywnie wysoka sztywność niski poziom histerezy mechanicznej. Zaproponowany schemat kinematyczny oraz przyjęte w projekcie parametry geometryczne zapewniają niski poziom generowanych błędów ogólnych, gdyż końcówka narzędzia w polu operacyjnym ma zdolności ruchu odpowiadające rozwiązaniom o dobrych własnościach tzw. ortotropowych (składowe przemieszczenia cząstkowe odbywają się na trzech ortogonalnych kierunkach w przestrzeni). W wybranym fragmencie przestrzeni roboczej manipulator ma dobre tzw. izotropowe własności kinematyczne co oznacza, że

wzmocnienia kinematyczne na poszczególnych kierunkach przemieszczeń składowych są do siebie zbliżone i np. generowane na tych kierunkach wielkości błędów są identyczne. Potwierdzona doświadczalnie rozdzielczość położenia końcówki narzędzia jest na każdym z kierunków ± 0.02 mm. Oszacowana dokładność odtwarzania trajektorii wynosi ok. 0.3 mm. Są to wielkości mechaniczne na obecnym etapie zaawansowania prototypu bardzo obiecujące, szczególnie że przy manualnym sterowaniu w układzie sprzężenia wzrokowego operator-system trajektoria nie będzie generowana w układzie bezwzględny lecz operator generuje sygnały sterujące przemieszczeniami w sposób różnicowy (przyrostowy). Uzyskane wyniki pozwalają stwierdzić, że wysokie własności układu elektromechanicznego pozwalają na krótką adaptację operatora.

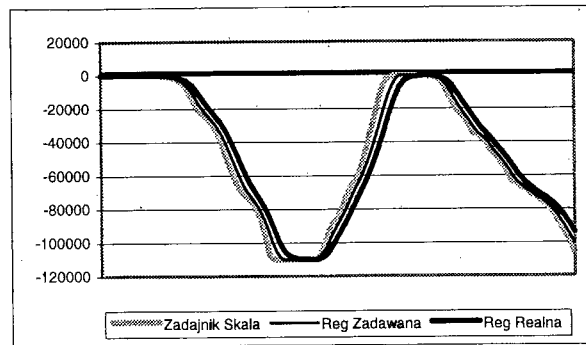
Badania wstępne wykazały że histereza mechaniczna ramienia manipulatora RH 0 zmierzona na końcówce w pozycji maksymalnego wysięgu wynosi 0.2 mm, dla robotów RH 1 wyniosła 0.03 mm natomiast dla RH 2 wartości histerezy wyniosła 0.02 mm. Zmierzony w tej konfiguracji ramienia współczynnik sztywności wynosił odpowiednio dla RH 0 = ok. $4.85 \cdot 10^3$ N/m dla RH1 = $2.86 \cdot 10^4$ N/m, a dla RH 2 = $5.5 \cdot 10^3$ N/m.

3.2 Testy układu napędowego i układu sterowania

Przeprowadzono testy uruchomieniowe silników elektrycznych różnych typów stanowiących napęd ramienia robota kardiochirurgicznego. Wszystkie silniki zostały elektrycznie dopasowane do jednolitego systemu sterowania pozycyjnego opisanego w poprzednim sprawozdaniu, a zawierającego: mikroprocesorowy sterownik pozycji (VMC) z regulatorem PID, specjalizowany sterownik silnika (bezszybkowego, DC, trójfazowego silnika AC), silnik z pomiarem położenia wału stanowiącym sprzężenie pozycyjne. Wykonano badania układu regulacji w zakresie śledzenia trajektorii sinusoidalnej o zmiennej częstotliwości oraz śledzenia ruchów zadajnika. Na potrzeby badań napisano oprogramowanie testowo-sterujące pracujące w systemie operacyjnym czasu rzeczywistego OS-9 na komputerze przemysłowym PEP. Oprogramowanie pozwoliło także na oszacowanie czasu trwania poszczególnych zadań stanowiących zasadnicze elementy sterowania układu sterowania ramienia robota.

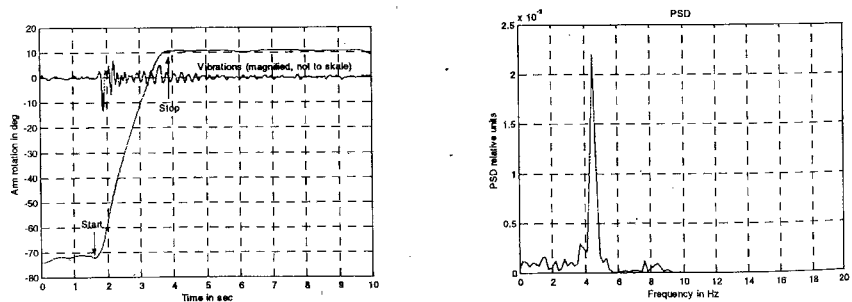
W toku badań przetestowano dwie karty procesorów produkcji PEP: VM30 i VM62 z procesorami Motorola odpowiednio 68030 i 68060.

Pierwszy prototyp RH 0 został poddany szczegółowym badaniom technicznym, które stanowiły podstawę dla projektu modelu RH1. Przeprowadzono między innymi testy weryfikacji wydolności obliczeniowej systemu (założony czas odświeżania < 1 ms), zdolności śledzenia założonej trajektorii (Rys.4) oraz próby wykonania podstawowych czynności chirurgicznych. Sterowanie ramieniem odbywa się w układzie ze sprzężeniem zwrotnym o stanowiącym w zasadzie regulator PID o odpowiednio dobranych parametrach uwzględniających fazę rozruchu, ruch ze stałą prędkością i fazę hamowania. Sam obiekt regulacji jest układem co najmniej drugiego rzędu, stąd możliwość pojawiania się oscylacji. Podczas ruchu ramię zaobserwowano drgania o częstotliwości około 5 Hz. Przykładowe widmo tych drgań przedstawia rysunek Rys.5.



Rys. 4. Rejestracja trajektorii: zadajnika, regulatora PID zadanej i regulatora PID rzeczywistej dla RH1, silnik Maxon2, bez obciążeń.

Działanie prototypu RH0 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° (zamiast 150° 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 1*. 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.



Rys 5. Oryginalny zarejestrowany sygnał z czujnika na tle trajektorii ruchu o kształcie trapezowym (po lewej) Gęstość mocy widmowej odzyskanego sygnału vibracji (po prawej). Wykorzystano czujnik przyspieszeń (metoda własna, konstrukcja układu własna, nowoczesne czujniki sprowadzone po raz pierwszy do kraju), do analizy drgań układu mechanicznego (amplitudy oraz częstości drgań) [1].

3.3. Plan eksperymentów na zwierzętach

Ostatnim badaniem przedklinicznym robota będą testy na zwierzętach w warunkach sali operacyjnej. Pod koniec roku 2003 zespół pracujący w projekcie uzyskał zgodę Komisji Etycznej Śląskiej Akademii Medycznej na przeprowadzenie pierwszej serii badań in-vivo robota *RobIn Heart*.

Spis procedur do wykonania w ramach pierwszego etapu eksperymentów na zwierzętach (świnie) obejmuje:

1. Zabieg chirurgiczny z użyciem robota chirurgicznego, w obrębie jamy brzusznej (usunięcie gonad, usunięcie woreczka żółciowego)
2. Zabieg kardiochirurgiczny z użyciem robota chirurgicznego na bijącym sercu (wykonanie wszczepienia by-passu)
3. Zabieg kardiochirurgiczny z użyciem robota chirurgicznego w krążeniu pozaustrojowym (wszczepienie sztucznej zastawki dwudzielnej)

W dalszym etapie, po przygotowaniu specjalizowanych narzędzi, planowane jest wykonanie operacji na zwierzęciu wszczepienia kaniul komory wspomaganie serca za pomocą robota.

PODSUMOWANIE

Trwają obecnie intensywne prace badawcze polskiego robota *RobIn Heart*. Efektem dotychczas przeprowadzonych są nowe modele robotów RH1 i RH2, które zastąpiły konstrukcję robota RH0 wykonanego w 2002 roku. Wprowadzane są modyfikacje i planowana jest wymiana niektórych elementów robotów w szczególności w układzie napędowym oraz przekazu napędu do kiści narzędzia. Projektowane są nowe narzędzia chirurgiczne i będą wprowadzane zmiany dotyczące technologii wykonania i zastosowanych materiałów, głównie mające wpływ na działanie końcówki narzędziowej. Doskonalony jest system sterowania zarówno w obszarze oprogramowania jak i optymalizacji funkcjonalności zadajnika ruchu. Uczestnicy projektu mają nadzieję, że znajdą sposób na sfinansowanie badań, prac konstrukcyjnych i doprowadzenie do wdrożenia klinicznego najpierw zrobotyzowanego ramienia dla kamery endoskopowej a następnie pełnego robota chirurgicznego.

PODZIĘKOWANIA

Praca finansowana z projektu badawczego KBN 8 T11E 001 18 oraz przez Fundację Rozwoju Kardiochirurgii. Serdecznie podziękowania składamy pracownikom KBN i sponsorom za zaangażowanie w nasz projekt, naszym licznym współpracownikom: M.Baczyńskiemu, M.Idzikowskiemu, M.Jakubowskiemu, E.Jeziarskiemu, A.Kandorze, A.Klisowskiemu, S.Miderze, W.Pawłowskiemu, R.Pruskiemu, D.Sławińskiemu, A.Wróblewskiej oraz sporej grupie studentów kilku uczelni, którzy pisali prace dyplomowe i magisterskie oraz uczestniczyli w zajęciach koła naukowego.

PIŚMIENNICTWO

- [1] S.Pietraszek, P. Kostka, Z. Nawrat: An Application of New Accelerometer Sensors for the Dynamics Examination of Polish Cardiac Surgery Robot – *RobInHeart*. World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering Sydney Australia 2003, wyd. na CD.