

Dr Zbigniew Nawrat
Fundacji Rozwoju Kardiologii, Zabrze,
Śląska Akademia Medyczna, Katowice
Dr inż. Paweł Kostka,
Instytut Elektroniki, Politechnika Śląska Gliwice
Fundacja Rozwoju Kardiologii, Zabrze
Mgr Marek Koźlak
Wydział Mechaniczno-Technologiczny, Politechnika Śląska, Gliwice

OCENA TECHNICZNA I BIOMEDYCZNA RODZINY ROBOTÓW KARDIOCHIRURGICZNYCH ROBIN HEART

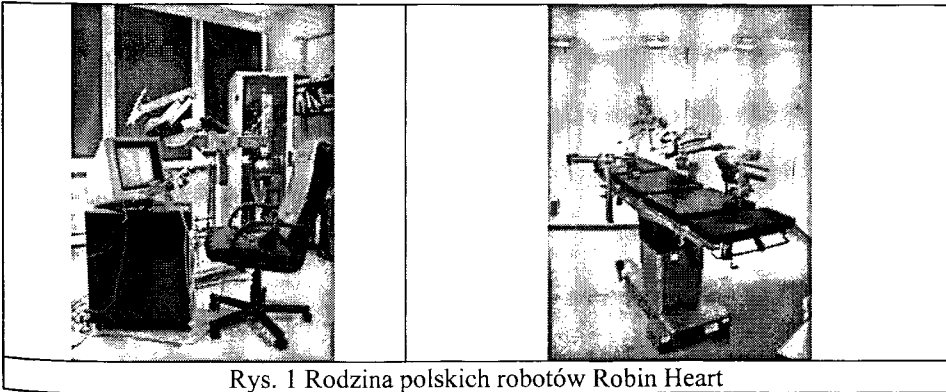
Polski projekt Robin Heart (pierwszy europejski robot kardiologiczny) to obecnie już rodzina oryginalnych telemanipulatorów wyposażonych w różne zadajniki ruchu, systemy sterowania i narzędzia wykonawcze. Komputerowe symulacja i modele fizyczne znajdują bezpośrednie i praktyczne zastosowanie do planowania operacji, optymalnego ustawienia i choreografii robota. Do badań symulacyjnych można zastosować modele w przestrzeni wirtualnej: pracującego robota na sali operacyjnej. W artykule przedstawiono zastosowanie całego spektrum metod modelowania i badań fizycznych (w tym testy wykorzystujące czujniki akcelerometryczne i żyroskopowe) dla oceny technicznej i biomedycznej robota Robin Heart.

TECHNICAL AND BIOMEDICAL EVALUATION OF ROBIN HEART CARDIO-ROBOT FAMILY

Current state of Polish Robin Heart cardiac surgery robot family (first European cardio-robot) is represented by original Master-Slave tele-manipulators equipped with user interface tool, control system and arm with surgery tool. Possibility of direct and practical usage of surgery procedures simulation both computer-and physical models of particular operation type for robot assisted cardiac surgery planning is presented. As a result of research connected with operation planning the optimisation of port location and choreography of robot arm for this cases is performed. Virtual reality (3D) software have been used for results presentation of the Robin Heart usage on operating room. As a next stage a multi-domain test results are presented toward evaluation of Robin Heart system. Both mechanical and electronic and control system part were tested using different type sensors and data acquisition environment.

1.ROBIN HEART

Robin Heart, jest polskim telemanipulatorem przeznaczonym do operacji chirurgicznych układu sercowo-naczyniowego. Obecnie jest testowanych kilka prototypów i modeli dla zoptymalizowania rozwiązań technicznych, które będą przedmiotem wdrożenia do produkcji. Na podstawie otrzymanej zgody Komisji Etycznej planowane jest przeprowadzenie pierwszych eksperymentach na zwierzętach. Robot a właściwie rodzina polskich robotów kardiochirurgicznych (operujących na tkankach miękkich), jest rezultatem prowadzonych od 2000 r. prac finansowanych przez KBN i Fundację Rozwoju Kardiochirurgii w Zabrze (Rys.1). Projekt badawczy powstał w grupie kierowanej przez prof. Zbigniewa Religę. W pracach nad tym projektem wziął udział interdyscyplinarny zespół złożony z przedstawicieli Pracowni Biocybernetyki FRK oraz Politechniki Łódzkiej (zespół prof. Leszka Podśędkowskiego) i Politechniki Warszawskiej (zespół dr Krzysztofa Mianowskiego). Projekt obejmował 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. Robot kardiochirurgiczny jest manipulatorem kopiującym, telemanipulatorem, składający się z dwóch (lub trzech) ramion narzędziowych i jednego trzymającego kamerę. Układ mechaniczny realizuje czynności manipulacyjne za pomocą siłowników elektrycznych. Założono, że robot będzie miał strukturę segmentową umożliwiającą zestawienie sprzętu dla różnych typów operacji. Samodzielny człon stanowi o szerokim zasięgu stosowania robot Robin Heart Vision z kamerą endowizyjną (opcja - sterowanie głosem).



Rys. 1 Rodzina polskich robotów Robin Heart

Głównymi założeniami stanowiącymi o funkcjonalności łańcucha kinematycznego telemanipulatora jest konstrukcja podwójnego czworoboku przegubowego. Zapewnia ona stałopunktowość w miejscu portu wprowadzenia narzędzia do organizmu pacjenta. Część napędowa kiści robota stanowi pięć niezależnych serwonapędów z silnikami prądu stałego. Takie rozwiązanie pozwala na uzyskanie trzech stopni swobody służących do orientacji w przestrzeni, czwarty odpowiada za otwieranie i zamykanie szczęk, a piąty umożliwia zwiększenie możliwości manewrowych, omijanie przeszkód oraz pracę „do tyłu” .

2. MODELOWANIE

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. Najtrudniejsze dla technik małoinwazyjnych są operacje na miękkich tkankach, tym bardziej jeżeli są w ciągłym ruchu, np. bijące serce. Im dalej dłonie chirurga są od przedmiotu operacji tym większego znaczenia nabiera zrozumienie zjawisk oddziaływania narzędzia z tkankami [1]. Dla realizacji kolejnych elementów projektu i badań polskiego robota wykorzystywane są metody modelowania komputerowego i modelowanie fizyczne.

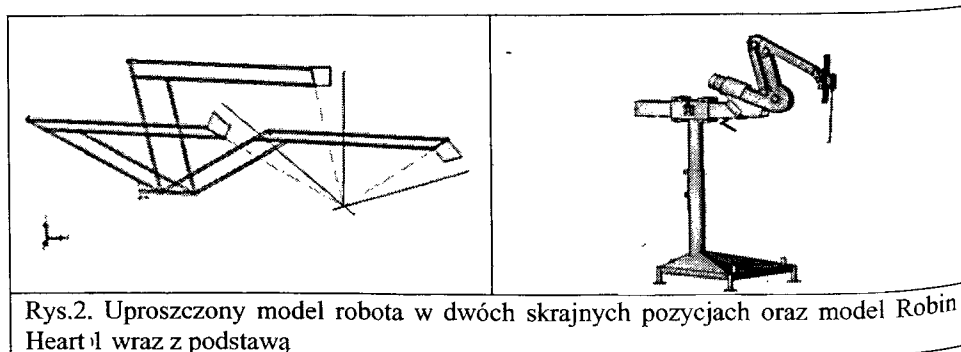
2.1. Modelowanie komputerowe

Wraz z rozwojem technik komputerowych posiadanie wirtualnego modelu urządzenia, stało się nieodzownym elementem nowoczesnego: projektowania, konstruowania, wytwarzania.

2.1. a Stałopunktowość telemanipulatora

Istotą konstrukcji telemanipulatora jest idea równoległowodu (podwójnego równoległoboku przegubowego) realizująca stałopunktowość kinematyczną. Pierwszy stopień swobody to obrót całego ramienia robota wokół osi równoległej do podłoża. Przestrzeń robocza przy takim rozwiązaniu ma kształt sfery o środku w miejscu przejścia endoskopu przez port w ciele pacjenta. Trzecim stopniem swobody jest prostoliniowy ruch wózka, na którym umieszczony jest endoskop. Ruch w trzecim stopniu swobody powoduje zmianę promienia sfery licząc od jej środka o zadaną wartość przesunięcia wykonywanego przez wózek [3].

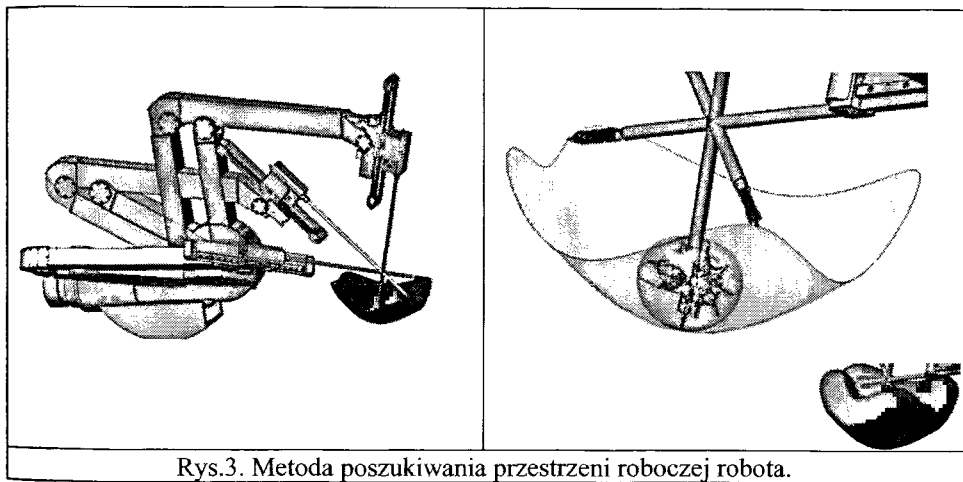
Całość telemanipulatora została podzielona na trzynaście elementów łącznie z ostoją (noga robota wraz z mocowaniem), gdzie stałopunktowość portu została uzyskana wykreślnie za pomocą dwóch napędzanych pojedynczym silnikiem równoległowodów. Celem identyfikacji punktu stałego, wykonano uproszczony model robota w środowisku CAD. Identyfikację tego punktu uzyskać można nakładając na siebie dwie skrajne pozycje pracy robota [2].



Rys.2. Uproszczony model robota w dwóch skrajnych pozycjach oraz model Robin Heart 1 wraz z podstawą

2.1. b Przestrzeń manipulacyjna

Końcówki robocze telemanipulatorów chirurgicznych posiadają trzy stopnie swobody służące do orientacji w przestrzeni, czwarty odpowiada zwykle za otwieranie i zamykanie szczęk, a piąty umożliwia zwiększenie możliwości manewrowych, omijanie przeszkód lub jak to jest w przypadku RobIn Heart pracę „do tyłu”. Stosując dla końcówki roboczej ten sam sposób postępowania poprzez nakładanie skrajnych pozycji, otrzymujemy jej zakres pracy, czyli przestrzeń manipulacyjną (Rys.3.) Po połączeniu „łódkowej” – niesymetrycznej sfery wynikłej ze stałopunktowości łańcucha kinematycznego z przestrzenią roboczą końcówki wyznaczono ogólną, możliwą przestrzeń pracy wewnątrz ludzkiego organizmu [2].



Rys.3. Metoda poszukiwania przestrzeni roboczej robota.

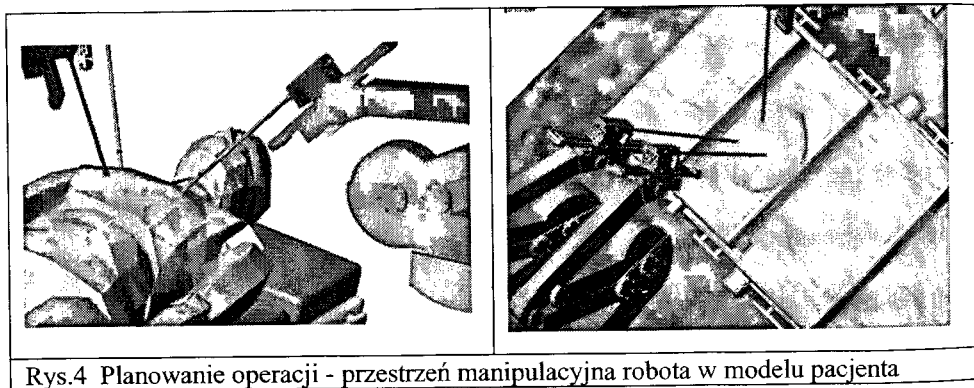
Zdefiniowano przestrzeń roboczą dla samej końcówki pracującej wewnątrz ludzkiego organizmu człowieka określając ją jako powierzchnię cylindryczną o średnicy poziomej 6cm i średnicy pionowej w osi narzędzia 5cm. Natomiast całkowita przestrzeń robocza została wyznaczona (dla środkowego położenia „szybkozłączki”) jako sfera, symetryczna względem osi symetrii robota o obwodzie 75cm i bokach długości 4.5cm, 16cm i 21cm, oraz głębokości 5.5cm. Dane te mają istotne znaczenie przy modelowaniu robota (założenia funkcjonalne robota) i planowaniu zabiegu chirurgicznego metodą małoinwazyjną [2].

2.1.c Planowanie operacji

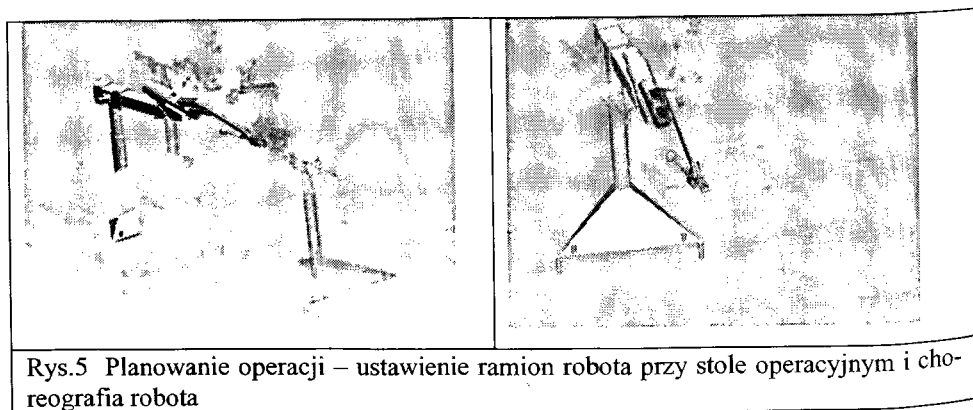
Komputerowe symulacje i modele fizyczne znajdują bezpośrednie i praktyczne zastosowanie do planowania operacji, optymalnego ustawienia i choreografii robota. Ustawienie ramion robota przy stole operacyjnym, optymalny wybór lokalizacji otworów w powłokach ciała pacjenta mają bezpośredni wpływ na przebieg operacji. Jednym z elementów testowanych na modelach jest analiza kolizyjności narzędzi i ramion robota podczas wykonywania różnych elementów operacji. Operacja wykonywana przy użyciu robota odbywa się na pacjentach o zróżnicowanych cechach osobniczych. Zmienna jest również przestrzeń robocza ze względu na miejsce i charakter przeprowadzanej procedury chirurgicznej. Idealną z punktu widzenia analizy kolizyjności byłaby sytu-

acja, gdzie chirurg sterując za pomocą panelu symulacyjnego modelem wirtualnym telemanipulatora przeprowadziłby symulację przeprowadzanej procedury operacyjnej. Mógłby wtedy przewidywać skutki swoich działań podczas rzeczywistej operacji, jak również planować ruchy w sposób jak najbardziej efektywny. Przeprowadzenie tego typu analizy wymaga posiadania modelu wirtualnego telemanipulatora, modelu wirtualnego sali operacyjnej, parametrycznego modelu operowanego regionu z uwzględnieniem w dużym stopniu dokładności miejsc najbardziej istotnych, którymi w kardiochirurgii są serce i arterie [3].

Łącząc ramię manipulatora chirurgicznego RobIn Heart I z jego podstawą, oraz ustawiając trzy takie ramiona wokół stołu operacyjnego z pacjentem, stworzono scenę roboczą telezabiegu umieszczając w niej otrzymaną wcześniej przestrzeń manipulacyjną.



Rys.4 Planowanie operacji - przestrzeń manipulacyjna robota w modelu pacjenta



Rys.5 Planowanie operacji - ustawienie ramion robota przy stole operacyjnym i choroografia robota

2.2. Modelowanie fizyczne

Symulacje i modelowanie tkanek oraz elementów operacji stanowi podstawę określenia założeń dla konstrukcji i sterowania robota, planowania operacji robotem oraz standa-

ryzacji testów robota (układ elektromechaniczny symuluje zachowanie tkanki). Przeprowadzono analizę dynamometryczną czynności charakterystycznych dla operacji kardiochirurgicznych oraz próby modelowania zachowania tkanek pod wpływem narzędzi. Analiza dynamometryczna czynności charakterystycznych dla operacji kardiochirurgicznych w czasie tworzenia założeń konstrukcyjnych obejmowała podstawowe czynności chirurgiczne; przebicie tkanki igłą chirurgiczną (zszywanie) i przecięcie tkanki skalpelem lub nożyczkami, czy też zaciągnięcie wężła chirurgicznego [1].

Rozwijane metody modelowania tkanek miękkich na podstawie analizy szeregu danych doświadczalnych stanowią podstawę do budowania algorytmów sterowania urządzeniem symulującym reakcję z tkanką naturalną. Określono następującą procedurę testu robota wykorzystującą te doświadczenia:

1. końcówka robota zostaje przymocowana do obiektu modelowego (lub przy próbach zderzeniowych jedynie się styka z obiektem modelowym)
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

Dzięki wprowadzeniu takiego postępowania możliwa jest obiektywizacja badań, standaryzacja testów porównawczych robotów i optymalizacja sposobu sterowania oraz konstrukcji robota w quasi- naturalnych warunkach.

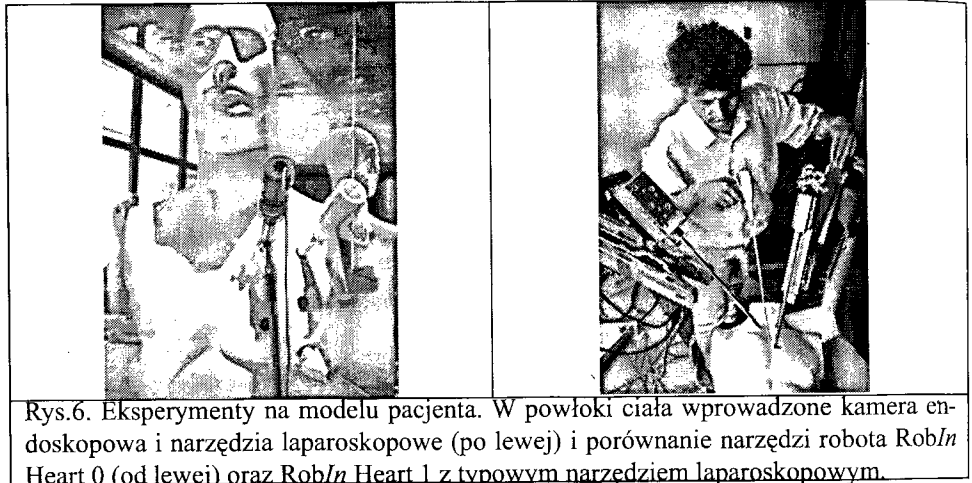
Prowadzone są warsztaty w czasie których testowane są roboty na modelach fizycznych i wykonywane ćwiczenia na tkankach zwierzęcych, porównywane różne narzędzia chirurgiczne (Rys.6). W kolejnych etapach projektu polskiego robota kardiochirurgicznego Robin Heart uczestniczą jego przyszli użytkownicy: studenci i lekarze. Według zgodnej opinii uczestników organizowanych w FRK warsztatów stanowią one niezwykłą okazję do samodzielnego poznania swoich umiejętności manualnych i odpowiedzi na pytania dotyczące relacji (zalet i wad) pomiędzy rodzajem oprzyrządowania a efektywnością wykonywania elementów operacji chirurgicznych. Dla konstruktorów stanowią niezbędne źródło inspiracji i informacji o akceptacji zrealizowanych projektów.

3. TESTY ROBOTA ROBIN HEART

Testy robota obejmują badania układów mechanicznych, układów sterowania, badania symulacyjne i laboratoryjne operowania oraz badania na zwierzętach i badania kliniczne. Obecnie kontynuowane są badania przedkliniczne laboratoryjne [1]. W zakresie badań układów mechanicznych prowadzone są:

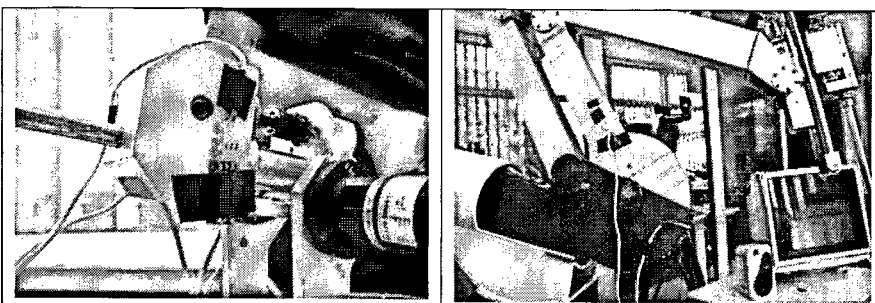
1. badania sztywności manipulatora z narzędziem na końcówce narzędzia
2. badania powtarzalności pozycjonowania końcówki przy różnych konfiguracjach ramienia na wytypowanych kierunkach w przestrzeni
3. badania osiągalnych sił oddziaływania końcówki narzędzia na otoczenie
4. badania osiągalnych prędkości 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



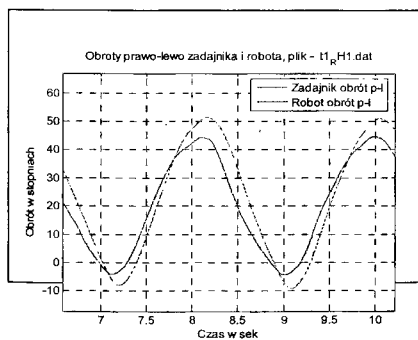
W wybranym fragmencie przestrzeni roboczej manipulator ma dobre tzw. izotropowe własności kinematyczne co oznacza, że wzmocnienia kinematyczne na poszczególnych kierunkach przemieszczeń składowych są do siebie zbliżone i np. generowane na tych kierunkach wielkości błędów są identyczne. Potwierdzona doświadczalnie rozdzielczość położenia końcówki narzędzia jest na każdym z kierunków ± 0.02 mm. Oszacowana dokładność odtwarzania trajektorii wynosi ok. 0.3 mm. Badania wstępne wykazały że histereza mechaniczna ramienia manipulatora RH 0 zmierzona na końcówce w pozycji maksymalnego wsięgu 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. 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 [1].

Do badań procesów przejściowych i drgań występujących podczas ruchu manipulatora wykorzystano dwa typy dwuosiowych monolitycznych czujników przyspieszenia oraz dwa typy monolitycznych żyroskopów, które pozwalają na pomiar składowych przyspieszeń w dwóch osiach, jak również, przy odpowiednim ustawieniu, na orientację czujnika względem wektora grawitacji. Niewielkie wymiary samych czujników pozwoliły na umieszczanie wielu czujników na ramieniu bez zakłócania jego pracy.

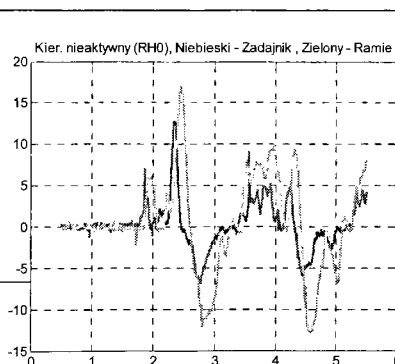


Rys. 7. Widok czujników na zadajniku operatora i ramieniu robota RobIn Heart 1

Zadajnik położenia/prędkości stanowiący interfejs operatora posiada zbliżoną strukturę kinematyczną do ramienia. Rys. 7 przedstawia umiejscowienie odpowiadających sobie czujników pomiarowych na zadajniku operatora oraz ramieniu telemanipulatora dla osi dwóch stopni swobody [4]. Do badań zastosowano dwa typy dwuosiowych monolitycznych czujników przyspieszenia: ADXL202E [3] o zakresie pomiarowym $\pm 2g$ i MXA2500 [4] o zakresie pomiarowym $\pm 1g$ oraz dwa typy monolitycznych żyroskopów ADXRS150 [5] i ADXRS300 [6] o zakresach pomiarowych $\pm 150\text{ }^\circ/\text{s}$ i $\pm 300\text{ }^\circ/\text{s}$. Wykonano badania mapowania ruchu RH1 (kierunek główny DOF2 – góra/dół) w postaci wyznaczonych na podstawie zarejestrowanych danych trajektorii zadajnika operatora i odpowiadającego mu stopnia swobody ramienia (Rys.8a). Otrzymał się opóźnienia w czasie ruchu w górę rzędu kilkunastu [ms], znacznie większe w II fazie ruchu (kilkadziesiąt [ms]). W porównaniu do pierwszego modelu Robin Hart 0 (100-150 [ms]) zanotowano znaczny postęp. Wprowadzono odpowiednie założenia dla konstrukcji nowego zadajny ruchu. Przeprowadzono również test prowadzenia zadajnika prostoliniowo wzdłuż jednego kierunku. Rys. 8b przedstawia wykresy trajektorii zadajnika i ramienia ilustrujące stopień odbiegania od prowadzenia ręki operatora wzdłuż zadanego kierunku. Wartości kątów ruchu dochodzą do $\pm 15^\circ$ przy amplitudzie ruchów w kierunku głównym ok. 60° , stanowiąc ok. 25% ich wartości.



Rys.8 a. Wykresy trajektorii zadajnika i ramienia



Rys. 8 b. Wykresy trajektorii zadajnika i ramienia dla kierunku nieaktywnego

Testy te zmierzają w kierunku opracowania optymalnego interfejsu chirurga operatora, z uwzględnieniem przeprowadzania na początek podstawowych procedur chirurgicznych.

4. PODSUMOWANIE

Uzyskane wyniki badań wskazują na poprawność zrealizowanych zadań zarówno w zakresie konstrukcji jak i sterowania. Uzyskane doświadczenie całego zespołu powoduje, że obecnie wprowadzane modyfikacje i zastosowanie najnowszych osiągnięć techniki; szczególnie w zakresie czujników i napędów przyczyni się do wytworzenia sprawnej i bezpiecznej maszyny pośredniczącej pomiędzy chirurgiem a jego pacjentem w czasie operacji.

W pracy przedstawiono praktyczne zastosowanie metod modelowania komputerowego i fizycznego do badań funkcjonalnych robota stosowanego do celów medycznych. Sprzętowe narzędzia badawcze w postaci czujników żyroskopowych i akcelerometrów w połączeniu z zaimplementowanymi procedurami ekstrakcji użytecznych informacji z oryginalnie zarejestrowanych sygnałów, zastosowano do obserwacji rzeczywistej trajektorii zewnętrznej zarówno zadajnika operatora jak i ramienia wykonawczego. Opracowana metodologia, została wykorzystana do analizy drgań w wybranych miejscach systemu telemanipulatora chirurgicznego Robin Heart i weryfikacji pracy systemu sterowania robota, w tym w istotnym procesie doboru parametrów PID regulatorów

W najbliższych latach planowany jest proces stopniowego wdrażania klinicznego Robin Heart'a finansowany z kilku źródeł (głównie projektu europejskiego EQUAL). Powstały w 2005 r. zakład gospodarczy FRK Robin Heart Service stanowi pierwszy krok w stronę komercjalizacji wytwarzanych projektów. Jako pierwsza na sali operacyjnej pojawi się kamera endowizyjna sterowana głosem – Robin Heart Vision. Obecnie trwają prace nad przygotowaniem prototypu klinicznego.

Podziękowania: Projekt robota Robin Heart był finansowany w ramach projektu badawczego KBN 8 T11E 001 18, obecnie przez Fundację Rozwoju Kardiologii i wielu sponsorów z których wymienię tylko Vattenfall, BPH, PKO SA. Dziękujemy wszystkim sponsorom, uczestnikom grantów, naukowcom i studentom, oraz konsultantom za wkład w realizację opisanych zadań.

Literatura.

- [1] Z. Nawrat: *„Polski robot kardiochirurgiczny”*. Postępy robotyki. Przemysłowe i medyczne systemy robotyczne. Praca zbiorowa pod redakcją Krzysztofa Tchonja. Warszawa 2005r. str. 117-129.
- [2] M.Koźlak, Z.Nawrat. „Nowe możliwości w chirurgii w oparciu o zdolności manipulacyjne systemu Robin Hart”. Majówka Młodych Biomechaników. Szczyrk 2005. Artykuł w materiałach konferencyjnych.
- [3] D.Tejszerska, Z.Nawrat, G.Ilewicz, A. Kandora. „Narzędzia modelowania inżynierskiego wykorzystane w mechanicznych analizach telemanipulatora kardiochirurgicznego Robin Heart 2.” Artykuł w materiałach konferencyjnych. Systemy ograniczające zagrożenia w procesach eksploatacji maszyn i urządzeń. ISDN 83-922681-4-8, wyd KOMAG, Tom II, str 81-91
- [4] S.Pietraszek, P.Kostka, Z.Nawrat, „Analiza ruchów ramienia robota kardiochirurgicznego RobInHeart z wykorzystaniem monolitycznych czujników przyspieszenia oraz żyroskopów”. Postępy Robotyki. Przemysłowe i medyczne systemy robotyczne. Praca zbiorowa pod red. Krzysztofa Tchonja. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności. Wydanie 1. Warszawa 2005. Str: 167-175.