

Krzysztof Mianowski
dr inż. adiunkt
ITLiMS Politechnika Warszawska
dr inż. Zbigniew Nawrat
Fundacja Rozwoju Kardiologii
w Zabrze
mgr. inż. Marek Poreda
absolwent Wydziału MEiL,
Politechnika Warszawska
kierunek automatyka i robotyka

STUDIUM PROJEKTOWE MANIPULATORA DLA ROBOTA KARDIOCHIRURGICZNEGO RobIn – Heart

W niniejszej pracy przedstawiono projekt telemanipulatora medycznego typu master – slave przeznaczonego do prowadzenia operacji małoinwazyjnych. Praca ta jest częścią projektu konstrukcyjno – badawczego koordynowanego przez Fundację Rozwoju Kardiologii w Zabrze, mającego na celu stworzenie oryginalnego, wielozadaniowego, zdalnie sterowanego robota medycznego, przeznaczonego do wspomaganie oraz wykonywania operacji na sercu lub operacji dotyczących modyfikacji układu sercowo-naczyniowego.

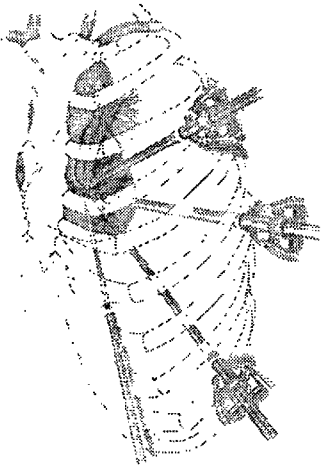
PROJECT-STUDY OF KARDIOSURGICAL ROBOT Robin Heart

Abstract: Project of master-slave telemanipulator for Minimally Invasive Surgery (MIS) is presented in the paper. This work is a part of the project coordinated by the Foundation for the Development of Cardiac Surgery, which aim is to create original, multitasks remotely controlled medical robot for cardiac surgery.

1. WSTĘP

1.1. Rozważania ogólne

Sposób prowadzenia zabiegu małoinwazyjnego (ang. MIS – *Minimally Invasive Surgery*) na sercu pokazano na rys.1, zabiegi takie nazywamy inaczej laparoskopowymi, gdyż do ich prowadzenia stosuje się specjalne narzędzia – laparoskopy, wprowadzane do wnętrza ciała pacjenta przez tzw. porty ulokowane w otworach (średnica około 1 cm) wykonanych w zewnętrznych powłokach ciała, bez wykonywania dużych cięć chirurgicznych.



a)



b)

Rys. 1 – Schemat typowego zabiegu małoinwazyjnego:

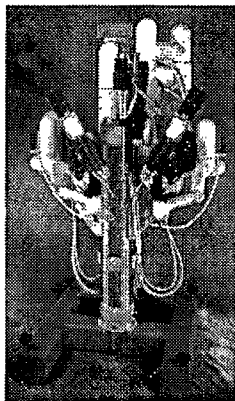
a) typowy rozstaw narzędzi, b) obraz wnętrza ciała z kamery endoskopowej

„Porty” mają za zadanie niedopuszczenie do rozerwania bądź poszarpania brzegów otworów wykonanych wcześniej w ciele operowanego. Następnie lekarz – chirurg, trzymając w rękach zakończone specjalnymi uchwytami narzędzia i wkładając je przez wspomniane „porty”, manipuluje nimi prowadząc w ten sposób zabieg. Obraz pola operacyjnego (Rys. 1b) obserwuje się za pomocą układu wizyjnego z kamerą endoskopową, której obrazówód, podobnie jak narzędzia, wprowadzany jest przez dodatkowy otwór do ciała pacjenta. Zwykle wystarczają trzy otwory – dwa na narzędzia i jeden dla endoskopu, chociaż w zależności od potrzeb, lub gdy wymaga tego technika operacji ich liczba może być większa. Z kamerą bardzo często zintegrowany jest przewód, którym tłoczony jest gaz obojętny (zazwyczaj jest to CO_2) pod niewielkim ciśnieniem. Ma to na celu stworzenie odpowiedniej przestrzeni do prowadzenia operacji. Pierwszą tego typu operację przeprowadzono w 1981 roku – było to wycięcie wyrostka robaczkowego. Pod koniec lat osiemdziesiątych operacje laparoskopowe stały się już powszechne i stosowano je w wielu różnych dziedzinach chirurgii.

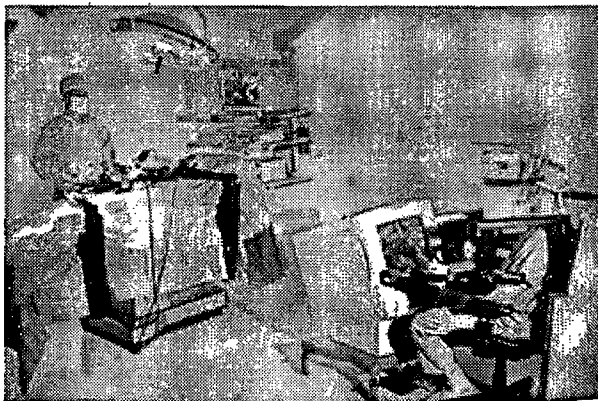
1.2. Manipulatory stosowane w chirurgii małoinwazyjnej

W związku z dynamicznym rozwojem laparoskopii jak również znacznym postępowaniem w dziedzinie robotyki, w ostatnim czasie pojawiły się roboty-telemanipulatory do zastosowań w chirurgii małoinwazyjnej. Pierwsze operacje kardiochirurgiczne z wykorzystaniem robotów przeprowadzili niemal równocześnie wiosną 1998 roku Alain Carpentier w Paryżu i Friedrich Mohr w Lipsku. W pierwszym przypadku była to operacja zastawki serca, w drugim wykonanie pomostu aortalno-wieńcowego, popularnie zwanego *bypassem*. We wrześniu ubiegłego roku również w Polsce zastosowano robota ZEUS do wykonania kilku operacji na sercu. Operację pomostowania naczyń wieńcowych wykonał zespół prof. Andrzeja Bochenka

w Katowicach [8]. Obecnie najbardziej znanymi na świecie i produkowanymi seryjnie telemanipulatorami przeznaczonymi do operacji małoinwazyjnych są Da VINCI® (Rys.2) firmy Intuitive Surgical oraz AESOP® i ZEUS® produkowane przez Computer Motion. Operacja prowadzona za pomocą telemanipulatora nie różni się zbyt od operacji metodą laparoskopową, jaką przeprowadza chirurg stojąc za stołem operacyjnym. Podobnie jak w wypadku klasycznego zabiegu małoinwazyjnego potrzebne są otwory zabezpieczone wspomnianymi wcześniej specjalnymi „portami”, przez które do ciała pacjenta wprowadzane są narzędzia. Technika prowadzenia operacji jest również taka sama. Podobnie są też rozmieszczane otwory. Natomiast zastosowanie robota zapewnia znacznie precyzyjniejsze wykonywanie ruchów narzędzi, dzięki czemu można uniknąć wielu błędów podczas samego zabiegu. Operujący za stołem chirurg szybko się męczy, gdyż pozycja w jakiej pracuje jest niewygodna, chirurg posługujący się telemanipulatorem siedzi wygodnie opierając ręce na oparciach fotela, dzięki czemu może znacznie dłużej prowadzić zabieg bez odpoczynku. Dzięki redukcji zakłóceń przez układy filtrujące sygnały w układzie sterowania można także wyeliminować efekt drżenia rąk chirurga podczas operacji co ma istotny wpływ na jakość wykonanego zabiegu. Widać więc, że potrzeba stosowania robotów również w chirurgii jest uzasadniona i konieczna. Operacja laparoskopowa z zastosowaniem telemanipulatora ma podobny przebieg do klasycznego zabiegu małoinwazyjnego. Na początku przygotowuje się pacjenta poprzez wykonanie kilku (zazwyczaj trzech) nacięć, w które następnie montuje się „porty”. Następnie wprowadza się przez nie narzędzia wykonawcze zamontowane na ramieniu robota ustawionego obok stołu na specjalnej kolumnie, bądź przymocowanego do stołu operacyjnego. Przez dodatkowy port wprowadzana jest również kamera zamocowana na podobnym ramieniu co laparaskopy ze zintegrowanym przewodem, którym tłoczony jest obojętny gaz (najczęściej CO₂). Operujący chirurg siedzi na specjalnym stanowisku wyposażonym w monitor, na którym obserwuje obraz pola operacyjnego i manetki zadajników, za pomocą których steruje narzędziami wykonawczymi umieszczonymi na ramionach robota.



a)



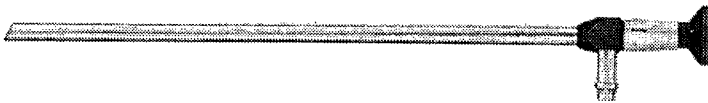
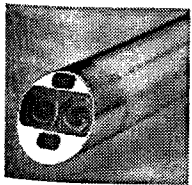
b)

Rys. 2. Roboty do operacji małoinwazyjnych:
a) da Vinci firmy Intuitive Surgical, b) ZEUS firmy Computer Motion

Manetki są wyposażone w czujniki pomiaru położenia chwilowego. Sterowanie odbywa się przez pomiar wychylenia kąowego i przemieszczenia zamienianego na sygnały elektryczne, które przetworzone np. do postaci cyfrowej są sygnałami zadanymi dla serwomechanizmów wychylenia i przemieszczenia narzędzi wykonawczych. Odpowiednią obróbką sygnału zajmuje się układ sterowania robota, który eliminuje zakłócenia związane np. z drżeniem rąk chirurga, jak również przekształca sygnał tak, aby przemieszczenia manetek rzędu kilkunastu centymetrów powodowały przemieszczenia ramion o kilka milimetrów. Dzięki takim zabiegom zwiększa się dokładność przemieszczania narzędzi a co za tym idzie i dokładność prowadzenia samej operacji. Istotną różnicą pomiędzy zabiegami małoinwazyjnymi prowadzonymi klasycznie a tymi, w których zastosowano telemanipulatory są stosowane narzędzia. Niemożliwym stało się wykorzystanie narzędzi stosowanych w klasycznej chirurgii małoinwazyjnej. W związku z tym zaczęto projektować narzędzia przeznaczone wyłącznie do zastosowania w czasie operacji z użyciem telemanipulatorów. Narzędzia te są wyposażone w specjalny system mocowania, pozwalający na zamocowanie laparoskopu na ramieniu telemanipulatora a jednocześnie szybki demontaż w razie przeciążenia urządzenia albo potrzeby odstawienia manipulatora i kontynuowania operacji przy użyciu klasycznych narzędzi.

1.3. Narzędzia operacyjne stosowane w operacjach z użyciem robotów

Do prowadzenia operacji z wykorzystaniem telemanipulatorów stosuje się narzędzia specjalne o konstrukcji bardzo podobnej do narzędzi laparoskopowych z tą zasadniczą różnicą, że narzędzia wykonawcze muszą posiadać własny zdalnie sterowany napęd najczęściej elektryczny. Zastosowanie napędu powoduje, że narzędzia te mogą być bardziej funkcjonalne, np. posiadać większą liczbę stopni swobody niż typowe narzędzia laparoskopowe. Wymagają jednak zastosowania odpowiednich układów sterowania. Kamera endoskopowa używana w robocie Da VINCI® wyposażona jest w podwójny układ soczewek, który zapewnia odpowiednią głębię ostrości widzenia, zwiększa rozdzielczość, eliminuje rozmazywanie obrazu oraz zapewnia dokładną równowagę kolorów (Rys.3a). Końcówki o 0 i 30 stopniowym kącie patrzenia optymalizują widok i minimalizują średnicę portu, przez który umieszcza się kamerę w ciele pacjenta [2].

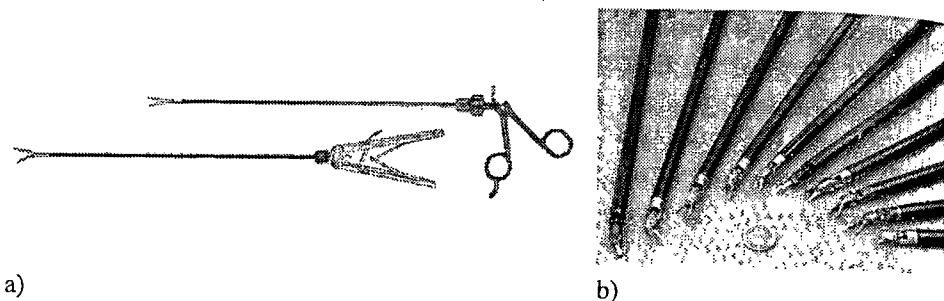


a)

b)

Rys. 3. Kamera endoskopowa do widzenia stereoskopowego

Laparoskop (Rys.3b) to sztywna luneta z odpowiednim układem soczewek, dająca szerokokątny wyraźny obraz o dużej rozdzielczości, wprowadzana do ciała pacjenta przez port. Oprócz takich laparoskopów wyróżnić można również laparoskopy pomocnicze wyposażone w różne narzędzia pomocne podczas wykonywania zabiegu małoinwazyjnego. Średnice standardowych laparoskopów wahają się od 5 do 11 mm. Najcieńsze z nich są wystarczające do diagnostyki i przeprowadzania prostych zabiegów. Wykonanie bardziej złożonej operacji wymaga jednak lepszego oświetlenia i większego pola widzenia, ewentualnie możliwości podłączenia toru wizyjnego.



Rys. 4. Narzędzia stosowane w operacjach małoinwazyjnych:

a) narzędzia laparoskopowe, b) końcówki narzędzi stosowanych w operacjach robotami

Na rys. 4 pokazano w sposób porównawczy typowe narzędzia laparoskopowe oraz zbiór końcówek narzędzi stosowanych w robotach chirurgicznych. Jak widać narzędzia mają pewne cechy wspólne, jak np. długi cienki wysięgnik, ale konstrukcja końcówek narzędziowych różni się znacznie, przede wszystkim wielkością. Narzędzia dla robotów są znacznie mniejsze i dokładniejsze i pozwalają na prowadzenie nawet bardzo złożonych operacji. Szczypce w tych narzędziach są zamykane i otwierane np. za pomocą popychacza napędzanego mechanizmem nożycowym [5]. Narzędzia są przeznaczone do różnorodnych czynności wykonywanych przez chirurga podczas operacji jak chwytanie, przytrzymywanie, cięcie, szycie.

2. CEL I PODSTAWOWE ZAŁOŻENIA PROJEKTU ROBOTA

2.1. Cel ogólny projektu

Celem projektu było stworzenie nowoczesnego, przyjaznego zarówno chirurgowi jak i pacjentowi narzędzia – telemanipulatora do prowadzenia operacji małoinwazyjnych – pozwalającego na bezpieczne, niezawodne i powtarzalne rezultaty kliniczne osiągnięte przy mniejszym bólu, urazie i krótszym czasie powrotu do zdrowia. Zgodnie z założeniami opracowanymi przez Instytut Rozwoju Kardiochirurgii w Zabrze ramię telemanipulatora musi posiadać minimum trzy stopnie swobody i zapewniać przestrzeń manipulacyjną zawartą w prostopadłości 600x600x300mm z możliwością wejścia końcówki narzędzia pod klatkę piersiową przez charakterystyczny stały punkt – „port” – pod dowolnym kątem. W razie konieczności kontynuowania operacji w sposób

klasyczny powinna istnieć możliwość szybkiego i bezpiecznego usunięcia robota z pola operacyjnego. Układ nośny robota powinien być stabilny, jezdny i/lub mocowany do stołu operacyjnego (ewentualnie nad nim), łatwy w obsłudze ręcznej do montażu i demontażu przy stole. Powinien to być układ niezależnych, bądź zwartych w bloku ramion wykonawczych, charakteryzujący się budową segmentową pozwalającą na zestawianie sprzętu do operacji różnego typu [7]. Dla zapewnienia odpowiedniego usytuowania manipulatora względem pacjenta mechanizm nośny powinien posiadać również co najmniej trzy stopnie swobody. Powinien też mieć możliwość zablokowania wszystkich ruchomych członów ustawczych, tak aby w czasie operacji pozostawał w stałej orientacji względem stołu operacyjnego. Układ wizyjny wraz z endoskopem powinien być niezależny, aby możliwe było jego zastosowanie poza kardiochirurgią. W dalszej perspektywie powinien to być również układ sterowany głosem chirurga. Koniecznym jest też zaprojektowanie szeregu specjalnych narzędzi przystosowanych do prowadzenia operacji laparoskopowych. Z uwagi na rozmiary „portów” stosowanych w czasie operacji, narzędzia te powinny charakteryzować się małymi wymiarami poprzecznymi ok. 8 – 10mm. Powinny to być narzędzia o możliwie prostej konstrukcji. W opracowywanym rozwiązaniu uznano, że korzystniej będzie zaprojektować kilka narzędzi o dwóch, trzech stopniach swobody niż jednego spełniającego te same funkcje, ale bardziej skomplikowanego i o większej liczbie stopni swobody. Należy dodać, że dla potrzeb badań funkcjonalności całego stanowiska z robotem, równoległe z pracami projektowo – konstrukcyjnymi, powstało wirtualne środowisko operacyjne, w którym odwzorowano przestrzeń sali operacyjnej wraz ze stołem chirurgicznym, pacjentem i stanowiskiem robota z konsolą sterującą.

2.1. Założenia techniczne

W toku prac projektowych sprecyzowano i uściślono podstawowe założenia, które powinno spełniać ramię wykonawcze projektowanego telemanipulatora. Dla zapewnienia odpowiednich własności kinematycznych przyjęto, że ramię będzie miało trzy stopnie swobody – dwa obroty wokół osi prostopadłych do siebie i jeden przesuw. Założono również, że będzie to mechanizm oparty na równoległowodach, co zapewni mu odpowiednią sztywność i dokładność pozycjonowania oraz w sposób mechaniczny stały, charakterystyczny wspólny punkt dwóch pierwszych ruchów obrotowych. Dzięki temu spełniony zostanie warunek na stałopunktowość mechanizmu – tzn. takie ruchy mechanizmu, które nie powodują obciążenia „portów”. Manipulator składać ma się z dwóch połączonych mechanizmów – *mechanizmu stałopunktowego* o dwóch stopniach swobody napędzanego silnikami prądu stałego do realizacji ruchu sferycznego, oraz *mechanizmu prostoliniowego* o jednym stopniu swobody do realizacji ruchu postępowego. W efekcie złożenia tych dwóch mechanizmów otrzyma się manipulator o trzech stopniach swobody (mechanizm kulisty) – zgodnie z założeniami projektu. Konstrukcja powinna być ostniona i wykonana z odpowiednich materiałów podlegających dezynfekcji po wykonanym zabiegu. Odpowiednią konstrukcję obudowy prototypu zapewnić mogą cienkościenne rury wykonane z duraluminium PA6. W manipulatorze docelowym zakłada się zastosowanie kompozytów jako materiału na obudowy, co zapewniłoby konstrukcji małą masę i małe wymiary gabarytowe a jednocześnie odpowiednią sztywność. Mała masa i małe wymiary gabarytowe przy

jednocześnie wysokich własnościach kinematyczno – funkcjonalnych mają być dodatkowym atutem mechanizmu. Manipulator powinien zapewniać takie ustawienie narzędzia wykonawczego – laparoskopu, aby możliwym było osiągnięcie przez narzędzie dowolnego punktu w jamie pierśiowo – brzusznej pacjenta w obszarze przestrzeni roboczej manipulatora. Zakres kątowy obrotów pierwszego i drugiego stopnia swobody powinien zostać tak dobrany, aby zapewnić możliwość wejścia końcówki narzędzia przez „port” pod dowolnym kątem. Po studiach nad budową anatomiczną człowieka okazało się, że I stopień swobody powinien zapewniać ruch w zakresie 0 – 180 stopni, natomiast II stopień swobody w zakresie 120 stopni, z przedziału 30 – 150 stopni. Zakresy ruchu liniowego na prowadnicy końcowej ustalono na 320mm. Maksymalne prędkości kątowe osiągane przez poszczególne pary kinematyczne powinny wynosić do około 0.5obr/s. Ramię wykonawcze musi spełniać odpowiednie założenia co do dokładności pozycjonowania końcówki narzędzia. Typowe szwy stosowane w kardiochirurgii przy zakładaniu bypassów to 7–0, czyli 0,05 mm. W związku z tym manipulator powinien poruszać końcówką narzędzia z rozdzielczością położenia nie gorszą od 0.02mm i dokładnością nie gorszą niż 0,05 mm [7].

3. KONSTRUKCJA MANIPULATORA ROBOTA RobIn Heart-2

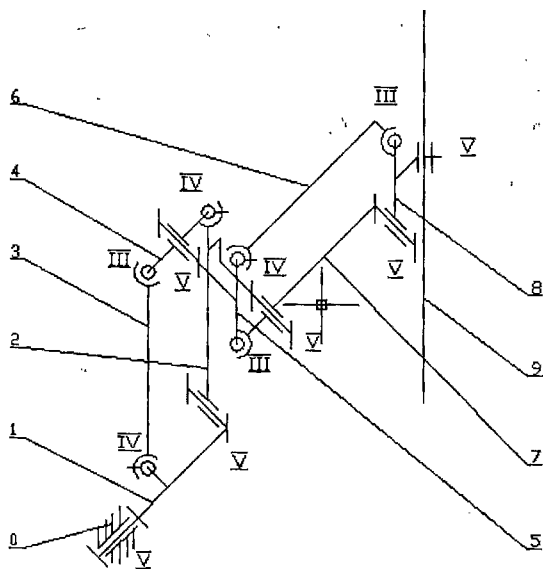
3.1. Platforma projektowa

Prace projektowe prowadzono w zintegrowanym środowisku CAD/CAM/CAE w systemie UNIGRAPHICS®. Zastosowanie systemu o wysokiej integracji poszczególnych modułów projektowych, technologicznych i przeznaczonych do badań inżynierskich pozwoliło na przeprowadzenie zarówno wstępnych prac koncepcyjnych, dotyczących wirtualnego przebadania np. własności kinematycznych planowanych rozwiązań już na etapie koncepcji wstępnej, jak też stworzenie trójwymiarowych modeli konstrukcji, zbadanie ich funkcjonalności oraz wykonanie pełnej dokumentacji technicznej. System ten wykorzystując do budowy modeli trójwymiarowych format „parasolid” umożliwia oprócz stworzenia bryły konstrukcji również zadanie jej odpowiednich własności materiałowych a co się z tym wiąże także automatyczne wyznaczenie masy i momentów bezwładności. Dzięki temu modele stworzone w UNIGRAPHICS’ie można było badać z użyciem modułu „MECHANISMS” lub w odmiennym środowisku, np. ADAMS®. Dane z UNIGRAPHICS’a posłużyły do stworzenia modeli kinematycznych konstrukcji w systemie ADAMS, który pozwolił na przeprowadzenie analiz kinematycznych i dynamicznych projektowanych mechanizmów.

3.2. Schemat kinematyczny ramienia robota RobIn Hart-2

W projekcie założono, że stałopunktowość realizowana będzie przez odpowiednie rozwiązania konstrukcyjne, co w konsekwencji oznaczało, że projektowany manipulator powinien zostać oparty na mechanizmach stałopunktowych. Mechanizmy te pozwalają na obrót członu wyjściowego w ten sposób, że jedna z osi obrotu znajduje się poza mechanizmem. Dzięki takiej konstrukcji mechanizm podczas pracy nie wchodzi w

kolizję z ciałem pacjenta. Zasadę działania takiego mechanizmu można wyjaśnić na schemacie kinematycznym pokazanym na Rys. 5. Człon oznaczony numerem „0” to podstawa – wspornik, poprzez który mechanizm mocowany jest do stołu operacyjnego.



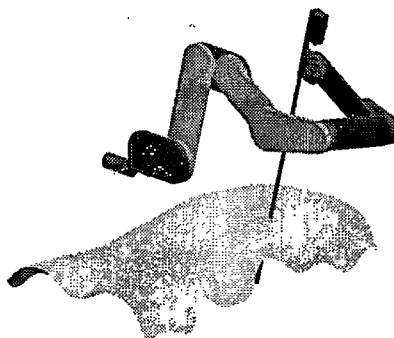
Rys. 5. Schemat kinematyczny mechanizmu manipulatora do operacji chirurgicznych

Człon „1” to skrzynka napędowa i wraz z elementami transmitującymi napęd, „2” na schemacie kinematycznym odpowiada krótszemu równoległowodowi. „3” to rura krótsza, „4” tarcza, do której przymocowany jest krótszy równoległowod a „5” tarcza dłuższego równoległowodu. Rura dłuższa na schemacie oznaczona jest numerem „6”. Dłuższy równoległowod ma numer „7”, a „8” odpowiada konsoli do mocowania mechanizmu prostoliniowego. W końcu numerem „9” oznaczony jest mechanizm prostoliniowy. Ruch obrotowy w parze 0-1 zapewnia przechylenie się ramienia z narzędziem na boki, pochylanie ramienia 3, poprzez sprzężenie kinematyczne z członami 3 i 4 oraz transmisję ruchu na odpowiednio ze sobą połączone człony 5, 6, 7 i 8, powoduje obrót członu 8 względem osi prostopadłej do płaszczyzny mechanizmu prostopadłej jednocześnie do osi 0-1 na przecięciu z osią wzdłużną narzędzia 9. To złożenie ruchów zapewnia przemieszczenia końcówki narzędzia w ruchu sferycznym. Ruch prostoliniowy w prowadnicy 8-9 powoduje promieniowe względem środka poprzedniego ruchu sferycznego wsuwanie/wysuwanie narzędzia 9 przez port do wnętrza ciała pacjenta.

3.3. Wstępna wersja rozwiązania ramienia robota RobIn Heart-2

W projekcie założono, że jedną z podstawowych cech opracowywanego rozwiązania konstrukcyjnego będzie modułowość, związana przede wszystkim z możliwością montowania różnych wersji rozwiązań pozwalających na uzyskanie najlepszych własności funkcjonalnych rozwiązania docelowego. Na wstępie, jako moduł podstawowy przyjęto specjalne rozwiązanie mechanizmu równoległowodowego

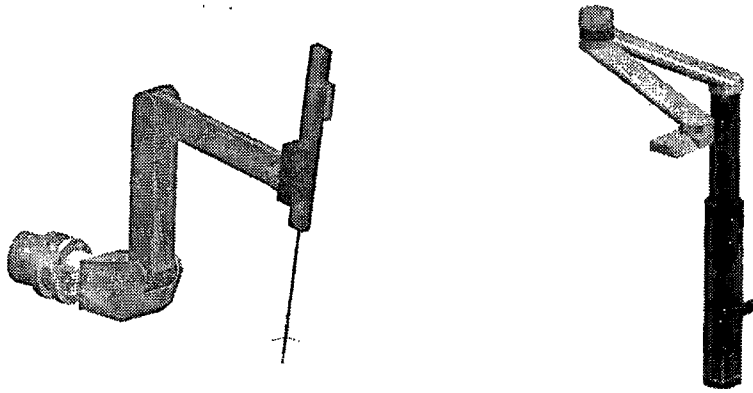
zintegrowanego z lekkim członem o konstrukcji powłokowej. Skupiono się na opracowaniu rozwiązania spełniającego założenia projektu, a jednocześnie jak najprostszego i jak najlżejszego. Przykład rozwiązania spełniającego przede wszystkim warunek stałopunktowości pokazano na Rys. 6. W tym rozwiązaniu w mechanizmie prostoliniowym użyto odpowiednio sprzężonych dwóch członów o identycznej długości, co pozwoliło na jego realizację z parami obrotowymi bez drogich i kłopotliwych w eksploatacji prowadnic liniowych kulkowych lub rolkowych. Badania symulacyjne wykazały bardzo wysokie własności funkcjonalne opracowanego rozwiązania, jednak niezbędne gabaryty oraz duża masa a także kłopoty z użytkowaniem podobnego rozwiązania mechanizmu prostoliniowego w robocie RobIn Heart-0 skłoniły autorów do odstąpienia od tej wersji.



Rys. 6. Wstępne rozwiązanie mechanizmu manipulatora kulistego

3.3. Wersja końcowa ramienia robota RobIn Heart-2

Po przeprowadzeniu symulacji wstępnie zaproponowanej konstrukcji przedstawionej w poprzednim punkcie z wykorzystaniem programu ADAMS[®] okazało się, że mechanizm ma między innymi za małą przestrzeń roboczą podczas, gdy zajmuje bardzo dużo przestrzeni w okolicy stanowiska operacyjnego. W związku z tym opracowano nową konstrukcję pozbawioną tych wad. Zweryfikowano założenia co do wartości zakresu kąтового ruchu w drugim stopniu swobody i wykorzystano inną wersję równoległowodu tym razem płaskiego w specjalnym wykonaniu. Opracowany manipulator pokazany jest na Rys. 7. W tej wersji zmieniono konstrukcję zarówno mechanizmu stałopunktowego jak i prostoliniowego. Manipulator podobnie jak poprzednio charakteryzuje się budową kompaktową. W konstrukcji mechanizmu prostoliniowego zastosowano wysokiej klasy prowadnice kulkowe liniowe i napęd typu koło zębate-zębatka liniowa. W proponowanej wersji mechanizm stałopunktowy zbudowany został z trzech cienkościennych rur o przekroju prostokątnym, w których zamknięte zostały specjalnie zaprojektowane równoległowody. W jednej z mniejszych rur znajduje się równoległowod sprężający ruch dla członu trzeciego. Łączniki równoległowodu tak skonstruowano, że pozwalają one na obrót tarcz w zakresie 150°. Zaprojektowany mechanizm charakteryzuje się budową modułową co oznacza, że składa się z kilku połączonych ze sobą segmentów (mechanizm stałopunktowy, mechanizm prostoliniowy, konsola mocująca, skrzynka napędowa, elementy transmitujące napęd). Takie rozwiązanie jest wysoce funkcjonalne,



Rys. 7. Manipulator robota RobIn Heart-2 – wersja końcowa:

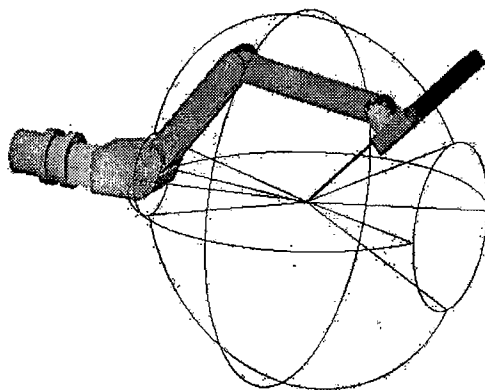
a) manipulator w widoku ogólnym, b) konsola mocowania do stołu operacyjnego

gdyż umożliwia łatwy montaż urządzenia. Jest to również mechanizm kompaktowy – osłonięty, zbudowany z cienkościennych rur, co ma duże znaczenie dla sterylizacji urządzenia. Dzięki zastosowaniu równoległowodów jako mechanizmów transmisyjnych i cienkościennych rur na obudowie uzyskano dużą sztywność poszczególnych członów ramienia a w konsekwencji również i całego urządzenia, przy stosunkowo niewielkiej masie. Równoległowodami umożliwiono dodatkowo umieszczenie napędów z dala od końcówki narzędzia co pozwoliło korzystnie rozłożyć masę. W konstrukcji zastosowano łożyska kulkowe, dzięki czemu po dokładnym zmontowaniu urządzenie charakteryzuje się niewielkimi oporami ruchu. Manipulator napędzany jest silnikami prądu stałego. Mocowany jest do specjalnej konsoli składającej się z dwóch ramion biernych i kolumny mocowanej do stołu operacyjnego. W projekcie docelowym rozważana jest możliwość zastosowania kompozytów na elementy nośne. Zaletą tego typu materiałów jest wysoka wytrzymałość w relacji do masy oraz odporność na korozję. Zastosowanie kompozytów jako materiałów konstrukcyjnych wydaje się być niezwykle atrakcyjne. Dzięki nim możliwym byłoby ograniczenie masy konstrukcji przy zachowaniu wymiarów gabarytowych, co w konsekwencji zaowocowałoby możliwością zastosowania mniejszych i lżejszych napędów, oraz mniej rozbudowanej konsoli ustawczej. Możliwym byłoby również zmniejszenie przekrojów poprzecznych elementów nośnych, co dalej ograniczyłoby masę konstrukcji. Zastosowanie kompozytów wymaga jednak dodatkowych analiz i obliczeń wytrzymałościowych.

4. KONCEPCJA STANOWISKA Z ROBOTEM RobIn Heart-2

4.1. Własności funkcjonalne manipulatora

Analizę funkcjonalności przeprowadzono w programie ADAMS®. W tym celu wykorzystano model bryłowy powstały przy opracowywaniu jego koncepcji i dokumentacji technicznej w systemie UNIGRAPHICS, który w formacie „parasolid” przeniesiono do ADAMS’a. W ADAMS’ie na model bryłowy nałożono odpowiednie więzy kinematyczne, dzięki czemu otrzymano model kinematyczny, który następnie poddano analizom.

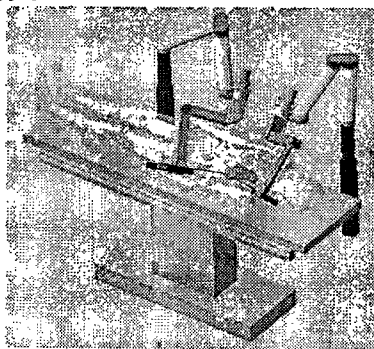


Rys. 8. Zakres przestrzeni roboczej manipulatora robota RobIn Heart-2

Badano zakresy kątowe poszczególnych par kinematycznych, przestrzeń roboczą manipulatora, oraz jego funkcjonalność z punktu widzenia prowadzenia operacji przez chirurga. Na Rys. 8 pokazano uzyskany metodami symulacyjnymi obraz zakresu przestrzeni roboczej manipulatora.

4.2. Badania nad metodami prowadzenia operacji z użyciem robota

Analizę możliwości prowadzenia operacji robotem przeprowadzono również przy użyciu programu ADAMS®. Aby to osiągnąć w poszczególnych parach kinematycznych napędów zadawano odpowiednie funkcje kinematyczne, które symulują rzeczywistą czynność wykonywaną przy użyciu manipulatora. Jako przykład rozważono ruch noża koagulacyjnego okalający serce. Widok stanowiska z robotem RobIn Heart-2 w rzucie ogólnym przedstawiono na Rys. 9. Widoczny na rysunku stół operacyjny oraz fantom obrazujący operowanego pacjenta opracowano na użytek tej pracy. Należy dodać, że powstały model w przyszłości może również posłużyć jako dobre środowisko do studiów nad najefektywniejszym rozmieszczeniem „portów”, oraz do ćwiczeń technik operacyjnych.



Rys. 9. Koncepcja ogólna stanowiska operacyjnego z robotem RobIn Heart-2

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Zaprezentowany w pracy manipulator z uwagi na zastosowanie równoległowodów i cienkościennych rur jako elementów transmitujących napęd i zapewniających nośność konstrukcji jest mechanizmem odpowiednio sztywnym i lekkim. Obliczenia wykazały, że użyto odpowiednich napędów, oraz dobrano prawidłowe przełożenia tak, aby prędkości osiągane przez człony kinematyczne były zgodne z założeniami. W celu uzyskania łagodnych profili prędkości podczas przyśpieszania i hamowania koniecznym jest zastosowanie odpowiednich przeciwcieżarów. Przestrzeń robocza manipulatora jest nieco mniejsza od zakładanej, ale wystarcza do prowadzenia zabiegu, co potwierdziła symulacja. Z badań symulacyjnych wynika również, że manipulatory nie zostały właściwie ustawione nad stołem operacyjnym, w związku z czym brakuje miejsca na mechanizm endoskopu. Wydaje się, że korzystniejszym rozwiązaniem byłoby zaprojektowanie konsoli mocujących o mniejszej liczbie stopni swobody i mniejszych wymiarach, do których mocowane byłyby manipulatory w ten sposób, że znajdowałyby się poza ciałem pacjenta na zewnątrz stołu a nie jak w proponowanym rozwiązaniu nad stołem i nad pacjentem.

Podziękowania

Praca powstała jako rezultat pracy dyplomowej mgr inż. Marka Poredy na kierunku Automatyka i Robotyka na Wydziale MEiL Politechniki Warszawskiej. Wyniki pracy wykorzystano w projekcie pierwszego polskiego robota kardiochirurgicznego RobIn Heart-2 w projekcie badawczym Fundacji Rozwoju Kardiochirurgii sfinansowanym przez KBN.

Piśmiennictwo

1. *Praca zbiorowa pod redakcją prof. dr hab. med. Tadeusza Mandeckiego: Kardiologia*, Wydawnictwo Lekarskie PZWL – Warszawa – 2000
2. *Materiały konferencji kardiologicznej*
3. *Wernicki P.: Operacja robot*, Polityka – nr 40/2001
4. *Romanowska D.: Przez dziurkę od klucza*, Newsweek – nr 04/2002
5. *Gordon A., Taylor P.: Laparoscopia praktyczna*, Medyczna Agencja Wydawniczo Informacyjna – Warszawa – 1994
6. *Praca zbiorowa pod redakcją Adama Moreckiego i Józefa Knapczyka: Podstawy robotyki*, WNT – Warszawa – 1994, wydanie II
7. *Robot kardiochirurgiczny – polski projekt. Wstępne założenia projektowe*, dokument wewnętrzny Fundacji Rozwoju Kardiochirurgii – Zabrze – 2001
8. *Nawrat Z., Religia Z.: Robot naprawia serce*, Wiedza i Życie – nr 08/2000
9. *Praca zbiorowa: Mały Poradnik Mechanika*, WNT – Warszawa – 1985, wydanie XVI
10. *Ciszewski A., Radomski T., Szummer A.: Materiałoznawstwo*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej – Warszawa – 1996
11. *Ashby M.F., Jones D.R.H.: Materiały inżynierskie – właściwości i zastosowania*, WNT – Warszawa – 1995, wydanie II

12. katalog produktów Maxon – 2001
13. katalog produktów HPC – 2002
14. <http://www.everestmedical.com/>
15. http://www.physweekly.com/archive/99/10_18_99/twf.html
16. <http://www.cs.cmu.edu>
17. <http://www.ifi.unizh.ch/groups/ailab/links/robotic.html>
18. <http://www.androidworld.com/>
19. <http://www.ctsnet.org/section/videogallery/>
20. <http://www.intuitivesurgical.com/html/index.html>
21. <http://www.computermotion.com/>
22. <http://www.rt.e-technik.tu-darmstadt.de/~hohm/lit/lit.html>
23. <http://www.ai.mit.edu/projects/leglab/>
24. <http://robotics.technion.ac.il/main.html>
25. <http://robotics.stanford.edu/>
26. <http://robotics.eecs.berkeley.edu/>
27. <http://www-robotics.usc.edu/>
28. <http://www.ynl.t.u-tokyo.ac.jp/publications/papers95/IEEE95/nakamura/main.html>
29. <http://www.cs.cmu.edu/afs/cs.cmu.edu/user/cjp/www/pubs/pubs.html>
30. <http://www.medicombelgium.com/robotics.htm>
31. <http://www.lynxmotion.com/> (inna tematyka)
32. <http://www.genobyte.com/robokoneko.html> *
33. <http://www.robotics.technion.ac.il/index.htm> *
34. http://www.-dse.doc.ic.ac.uk/~nd/surprise_96/journal/vol4/ao2/report.html *
35. <http://www.intron.kz.tsukuba.ac.jp/intron.kz.tsukuba.ac.jp/index.htm> *
36. [http://www.hsforum.com/stories/articleReader\\$427](http://www.hsforum.com/stories/articleReader$427) *
37. <http://www.robotics.eecs.berkeley.edu/~mcenk/medical/index.htm> *
38. <http://www.crsrobotics.com/index.htm> *
39. <http://www.caip.rutgers.edu/vrlab/index.htm> *
40. <http://www.intuitivesurgical.com/index.htm> *
41. <http://www-robotics.cs.umass.edu/content.html> *
42. <http://hrl.harvard.edu/intro.html> *
43. <http://www.dprg.org/links.html> *