

Dr.hab. inż. Leszek Podseǳkowski, prof.PŁ
Politechnika Łódzka
Dr , Zbigniew Nawrat, dyr.naukowy IPS
Fundacji Rozwoju Kardiochirurgii
adiunkt Śląskiej Akademii Medycznej
Mgr inż. Piotr Wróblewski, asystent
Politechnika Łódzka

ROBIN HEART 1

– OPIS KONSTRUKCJI MECHANICZNEJ

Wynikiem prowadzonego w latach 2000-2003 projektu przez Fundację Rozwoju Kardiochirurgii w Zabrze we współpracy ze specjalistami z Politechniki Łódzkiej i Warszawskiej są trzy wersje robota o nazwie RobIn Heart. W artykule przedstawiona jest konstrukcja mechaniczna robota RobIn Heart 0 oraz najbardziej zaawansowana technologicznie wersja RobIn Heart 1.

THE ROBIN HEART

– DESCRIPTION OF CONSTRUCTION

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 2000-2003. The mechanical construction of Polish cardiosurgical robot RobIn Heart 0 and most technically advanced version RobIn Heart 1 is presented in the paper.

1. WSTĘP

Robotyka medyczna i chirurgia wspomagana komputerowo są od prawie dziesięciu lat dynamicznie rozwijającą się dziedziną współczesnej inżynierii medycznej. Robot kardiochirurgiczny to teleoperator służący do wykonywania w sposób małoinwazyjny operacji na sercu. Robot składa się z mechanicznego manipulatora (dwóch ramion narzędziowych i jednego trzymającego kamerę), systemu sterowania i programowania. Chirurg obserwując obraz z wnętrza organizmu za pomocą kamery endowizyjnej trzyma w dłoni zadajniki ruchu i poruszając nimi wydaje za pośrednictwem komputera polecenia ruchu mini-narzędzi chirurgicznych wsuniętych przez niewielkie otwory w ciele pacjenta. Ze względu na strukturę kinematyczną manipulatora można wyszczególnić dwie części mechaniczne: ramię – układ kinematyczny pozycjonowania oraz kiść – układ kinematyczny zmiany orientacji końcówki. Narzędzie umieszczone na końcu ramienia (szybkozłączka) składa się z kiści i końcówki roboczej (chwytak, nożyczki, skalpel itp.). Obecnie stosowane klinicznie są na świecie dwa typy robotów: da Vinci (Intuitive Surgical) i Zeus (Computer Montion). Rezultatem polskiego projektu badawczego ukończonego w czerwcu 2003 r. jest RobIn Heart (RH), a właściwie trzy prototypy oznaczane jako RH0, RH1 oraz RH2. Każdy z robotów

stanowi przykład nieco innego rozwiązania problemu nowoczesnego narzędzia chirurga [3]. Prace nad polskim robotem finansowane przez KBN i Fundację Rozwoju Kardiologii w Zabrze (FRK) prowadzone są od 2000 r. pod kierunkiem prof. Zbigniewa Religi. Projekt badawczy realizowany przez multidyscyplinarny zespół w kilku ośrodkach naukowych w Polsce objął 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 ramach projektu badawczego na początku został zbudowany prototyp wstępny: ramię narzędziowe realizujące kinematyczną stałopunktowość - *RobIn Heart 0*. Prototyp wstępny został poddany szczegółowym badaniom technicznym. W konstrukcji prototypu *RobIn Heart* 1 wprowadzono zmiany: zmniejszenie masy zespołu napędowego kiści, zwiększenie sztywności ramienia i układów przeniesienia napędu, oraz zmniejszenie jego gabarytów, zwłaszcza w kierunku poprzecznym. W artykule zostanie opisana konstrukcja RH0 i RH1.

2. RZUT OKA NA WSPÓŁCZESNĄ SALĘ CHIRURGICZNĄ

Tradycyjna chirurgia zastępowana jest coraz szerzej przez tzw. chirurgię małoinwazyjną (MIS – Minimally Invasive Surgery), czyli chirurgię laparoskopową. W czasie operacji laparoskopowej przez jeden z kilku niewielkich otworów w powłoce ciała pacjenta pompowany jest dwutlenek węgla, który unosi, w zależności od operacji, klatkę piersiową lub powłoki brzuszne, zwiększając przestrzeń roboczą chirurga. Następnie wsuwa się przez niego endoskop wyposażony w kamerę wideo, dzięki któremu chirurg podczas zabiegu obserwuje wnętrze organizmu. Przez pozostałe dwa otwory wprowadza się odpowiednie narzędzia chirurgiczne z długim (ok. 0,5m) ramieniem (są to w zależności od potrzeby: nożyczki, klipsownicy, narzędzia koagulacyjno-tnące, narzędzia zszywające i in.).

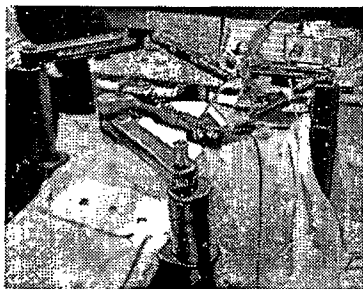
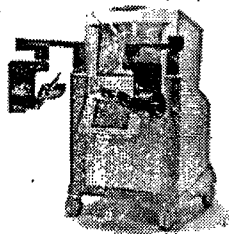
Stosowanie technik małoinwazyjnych wiąże się ze zmniejszeniem urazu tkanek, zmniejszeniem zagrożenia infekcją i innymi komplikacjami. Oddalenie dłoni chirurga od przedmiotu operacji, ogranicza jednak naturalne wykorzystanie dotyku i stawia nowe wyzwania dla narzędziowego wyposażenia chirurga. Konwencjonalny instrument laparoskopowy ma zwykle jedynie 4 stopnie swobody. Z tego powodu, zręczność chirurga podczas zabiegu laparoskopowego jest znacznie zredukowana..

Jak wynika z analiz przeprowadzonych przez firmę Computer Motion 72% operacji małoinwazyjnych (jest ich rocznie wykonywanych ok. 4 mln) można wykonać za pomocą robotów [1]. Najistotniejszym obszarem zastosowania robotów jest wykonywanie zabiegów bez zatrzymywania serca. Do dzisiaj najczęściej robot służy tylko do wykonania części operacji na sercu – resztę wykonuje się narzędziami laparoskopowymi. Jednak dzięki wprowadzonym nowościom technicznym i wzrastającym doświadczeniu chirurgów rośnie liczba w pełni endoskopowych operacji by-pass tzw. TECAB (totally endoscopic coronary artery bypass grafting). W 2001 roku przeprowadzono też pierwszą teleoperację na odległość 7 tys. km. z Nowego Jorku do szpitala w Strasburgu (Francja). Do Operacji Lindbergh wykorzystano system telechirurgiczny ZEUS opracowany przez firmę Computer Motion - usunięcie pęcherzyka żółciowego.

Jednym z najbardziej znanych, pierwszym narzędziem typu *Master-Slave* na sali chirurgicznej (od 1994r.) jest AESOP (Auto Endoscopic System for Optimal

Positioning) - system zdalnego pozycjonowania endoskopu (głosem) firmy Computer Motion (Goleta, CA). Znajduje zastosowanie w wielu zabiegach laparoskopowych chirurgii sercowo-naczyniowej, w urologii, chirurgii ogólnej i ginekologii. System ten może być łączony w sieć przy pomocy następujących komponentów: **Hermes** - centrum kontroli, **Zeus** - pozycjonuje endoskop robota, **Socrates** - system umożliwiający zastosowanie w zdalnej chirurgii. Zrobotyzowane ramię kamery endowizyjnej pozwala na ograniczenie zespołu przy stole operacyjnym oraz skrócenie zabiegu.

System da Vinci produkowany przez niedawnego konkurenta firmę Intuitive Surgical (w 2003 roku firmy się połączyły) składa się z konsoli służącej do obserwacji i kontroli operacji przez chirurga oraz trzech ramion robota (dwóch wyposażonych w narzędzia chirurgiczne, trzecie - kamerę endoskopową) umieszczanych na jednej podstawie przy stole operacyjnym. Narzędzia sterowane są przy użyciu intuicyjnego zadajnika ruchu wykorzystującego technologię EndoWrist modelującą ludzki nadgarstek. Po odsprzęgnięciu za pomocą nożnego przełącznika steruje się położeniem kamery endoskopowej.



Rys. 1. Robot Zeus

Rys. 2. Robot Da Vinci

ZEUS jest nieco innym systemem: ramiona robota są mocowane do stołu operacyjnego zaś endoskop sterowany jest głosem chirurga. Operator siedzi przed monitorem trzymając w dłoni uchwyty wyposażone w szereg przycisków. Posiada co prawda cieńsze narzędzia, ale dopiero w rok temu wdrożył klinicznie narzędzie posiadające równie wysoką ruchliwość jak da Vinci - 6 stopni swobody. Obydwa systemy znajdują coraz szersze zastosowanie zarówno w chirurgii dorosłych jak i pediatrii. Podsumowując, obszar stosowania tych robotów, z założenia przeznaczonych do operacji na sercu obejmuje dziś również chirurgię naczyniową (przeszczepy tętnicze, operacje aorty, tętniaki piersiowe i brzuszne), chirurgię ogólną (usunięcie pęcherzyka żółciowego, przepukliny pachwinowej, prostaty, resekcja okrężnicy), ginekologię (usunięcie macicy, podwieszenie szyjki pęcherza).

3. ROZWÓJ KONSTRUKCJI MECHANICZNEJ

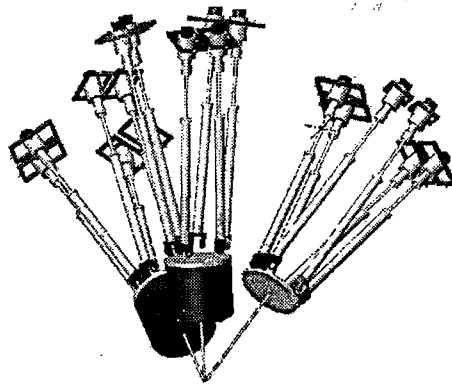
W projekcie postanowiono, że badania nad konstrukcją prototypu będą się rozwijały szerokim frontem. Miało to na celu wykreowanie we wstępnej fazie możliwie dużej liczby projektów wstępnych i przeanalizowanie ich pod kątem własności funkcjonalnych. Pierwszy rok prac był dodatkowo przeznaczony na przeanalizowanie wszystkich zadań stawianych przed robotem oraz wymogów jakie powinien spełniać.

Pierwszym z tych wymogów jest sposób w jaki robot zapewnia, że narzędzie laparoskopowe będzie stale przechodziło przez jeden punkt w przestrzeni pokrywający się z otworem wykonanym w powłokach skórnych pacjenta (tzw. portem). Problem ten został nazwany sposobem realizacji stałopunktowości. Sposób realizacji tego postulatu może być bardzo zróżnicowany i wpływa w sposób zasadniczy na wybór konstrukcji. Zasadniczo są trzy metody realizacji stałopunktowości: kinetyczna, pasywna, aktywna. Stałopunktowość pasywna jest rozwiązaniem wzorowanym na klasycznej laparoskopii. Punkt przejścia narzędzia przez ciało pacjenta traktuje się jak przegub 4 klasy odbierający 2 stopnie swobody. Jest to innymi słowy punkt podparcia narzędzia. Aby odebrać narzędziu wszystkie 6 stopni swobody, ramię robota musi odbierać ich cztery: 3 stopnie swobody są określone przez ustalenie położenia zewnętrznej końcówki narzędzia. W robocie Zeus (rys. 1.) jest to realizowane za pomocą manipulatora typu SCARA. Aby układu nie przesztynić, konieczne są dwa przeguby nie napędzane (rodzaj przegubu Cardana) na połączeniu ramienia robota z narzędziem. Kolejny stopień swobody – obrót narzędzia względem jego osi jest zwykle napędzany silnikiem. Wadą tego rozwiązania jest obciążenie portu siłami pochodzącymi od narzędzia, a także zależność położenia narzędzia od ewentualnych ruchów portu. Znacznie wzrasta również podatność narzędzia a zmniejsza się jego dokładność, zwłaszcza przy granicach pola pracy.

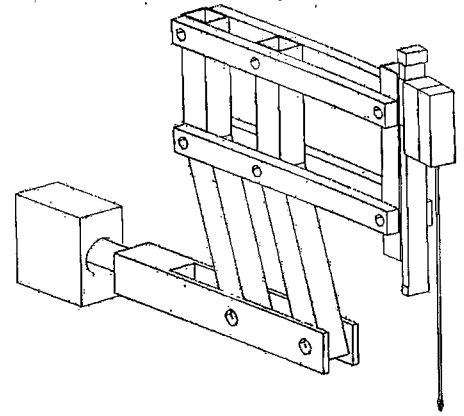
Stałopunktowość aktywna korzysta z nadmiarowego układu kinematycznego. Robot ma o dwa stopnie swobody więcej niż potrzeba do poruszania narzędziem. Stałopunktowość jest realizowana na poziomie sterowania. Port (a dokładniej ciało pacjenta wokół portu) jest traktowane jako przeszkoda, a robot ma za zadanie osiągać punkty pracy omijając tę przeszkodę. Kinematyka takiego robota może być bardzo różna: od układów otwartych do zamkniętych.

Stałopunktowość kinematyczna polega na skonstruowaniu robota o kinematyce sferycznej i o środku tej sfery w punkcie przejścia narzędzia przez otwór w ciele pacjenta. Wymaga to stosowania dość skomplikowanych układów mechanicznych opartych na równoległowodach. Dzięki nim możliwe jest utworzenie struktury kinematycznej, w której jeden z elementów obraca się wokół osi znajdującej się całkowicie poza mechanizmem. Należy jednak pamiętać, że w tej konstrukcji oprócz zdalnie sterowanych stopni swobody muszą jeszcze istnieć dodatkowe przeguby ustawcze doprowadzające punkt, wokół którego obraca się narzędzie do otworu w ciele pacjenta. Jest to wykonywane każdorazowo przed rozpoczęciem operacji. Stałopunktowość kinematyczną zastosowano w robocie Da Vinci (rys. 2).

W pracach nad polskim robotem kardiochirurgicznym jedną z pierwszych rozważanych konstrukcji był robot o stałopunktowości aktywnej. Konstrukcja ramienia oparta była o rozwiązanie typu platforma Stewarda (rys. 3). Rozwiązanie to zarzucono z powodu zbyt małego zakresu ruchów kątowych platformy. Dodatkowo dużym problemem było takie skonstruowanie ramion, by w całym zakresie ruchów nie zawadzały o siebie.

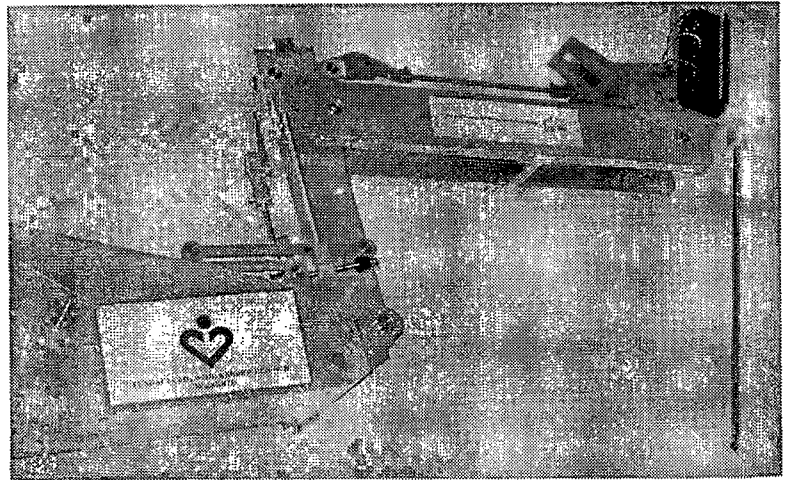


Rys. 3. Projekt robota kardiochirurgicznego o stałopunktowości aktywnej.



Rys. 4. Jeden z projektów wstępnych ramienia.

W dalszych rozwiązaniach stosowano stałopunktowość kinematyczną. Jedno z rozwiązań przedstawiono na rys. 4.



Rys. 5. Ramię robota RobIn Heart 0

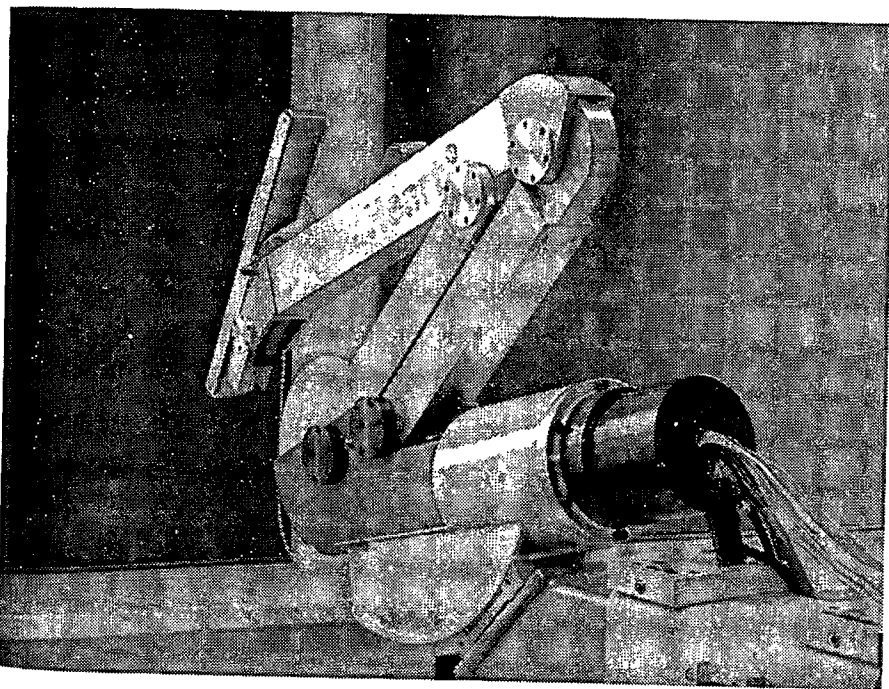
W związku z pionierskim charakterem projektu postanowiono silnie zaangażować w prace konstrukcyjne studentów w ramach prac dyplomowych. Dzięki temu dzisiaj posiadamy już spora kadrę młodych naukowców specjalizujących się w tej rzadkiej dziedzinie. Rezultatem pierwszego roku pracy nowego zespołu jest prototyp RobIn Heart 0 (rys. 5). W tej wersji wykorzystano stałopunktowość kinematyczną. W robocie tym zdecydowano się na przetestowanie trzech nietypowych rozwiązań

konstrukcyjnych. Pierwsze z nich to układ podwójnej dźwigni do napędu pokłonu ramienia. Dzięki temu rozwiązaniu osiągnięto zakres ruchu 150 stopni. Drugim rozwiązaniem była struktura kinematyczna realizująca ruch liniowy oparta o układ równoległowodów. Trzecie testowane rozwiązanie dotyczyło układu przeniesienia napędu również bazującego na równoległowodach. Robot ten został następnie poddany testom i na ich podstawie zaproponowano modyfikacje a właściwie całkiem nową strukturę robota *RobIn Heart 1*. Podstawowe jej cechy zostaną przedstawione w rozdziale 3.

Równolegle do prowadzonych w Łodzi prac nad robotem *RobIn Heart 1* w Warszawie opracowywano konstrukcję mechaniczną robota *RobIn Heart 2* opisanego w osobnym artykule.

4. ROBIN HEART 1 – KONSTRUKCJA MECHANICZNA

Ostateczna wersja ramienia robota kardiochirurgicznego *RobIn Heart 1* zaprojektowana w Łodzi ma kinematykę typu sferycznego (rys. 6).



Rys. 6. Ramię robota *RobIn Heart 1*

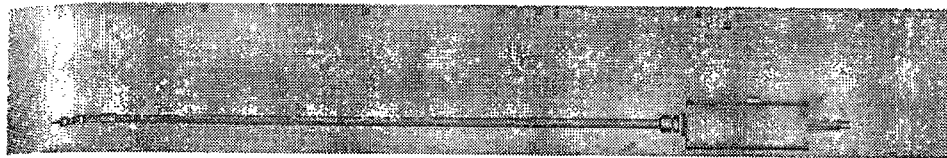
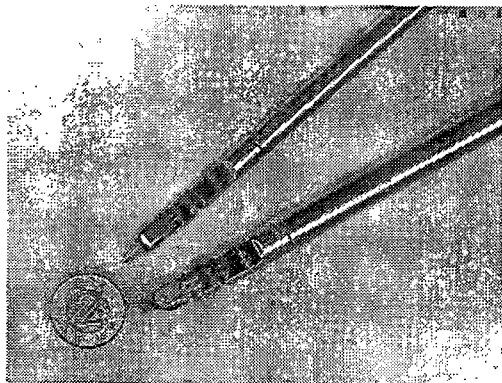
Pierwszy st. sw. jest obrotowy. Jest on napędzany przez silnik *Harmonic Drive®* zblokowany z przekładnią falową, hamulcem i łożyskiem krzyżowym. Zakres ruchu na tym st. sw. jest teoretycznie dowolny, ale z uwagi na możliwość kolizji z pacjentem został ograniczony do 180°.

Do wału wyjściowego napędu pierwszego stopnia sw. jest przymocowany mechanizm równoległowodowy drugiego stopnia swobody. Dzięki zachowaniu odpowiednich odległości pomiędzy poszczególnymi przegubami mechanizmu napęd liniowy obraca się wokół osi nieruchomej względem korpusu drugiego stopnia swobody i znajdującej się poza mechanizmem. Oś ta przecina się z osią obrotu silnika 1, czyli z osią pierwszego stopnia swobody. Dzięki właściwym długościom elementów mechanizmu równoległowodowego można przemieszczać ramię robota względem pacjenta w bardzo dużym zakresie bez ryzyka kolizji ramienia z pacjentem. Napęd drugiego stopnia swobody (podobnie jak i wszystkie następne) został zrealizowany za pomocą silnika bezszczotkowego firmy Maxon. Zastosowanie napędów bezszczotkowych pozwala maksymalnie ograniczyć zakłócenia elektromagnetyczne emitowane przez robota.

Jak wykazały wcześniejsze badania prototypu *RobIn Heart 0* kluczową sprawą dla właściwego działania robota jest uzyskanie właściwej sztywności. Jest to zarazem zadanie trudne do wykonania, gdyż struktura drugiego stopnia swobody jest bardzo złożona, z wieloma przegubami i mająca znaczną długość w porównaniu do swoich wymiarów poprzecznych. Dodatkowym problemem jest zachowanie jak najmniejszej masy poszczególnych elementów, szczególnie znajdujących się na końcu łańcucha kinematycznego. Sztywność ramienia uzyskano stosując odpowiednio sztywne człony oraz specjalną konstrukcję przegubów. Wszystkie człony są wykonane jako zamknięte profile a przeguby są zrealizowane za pomocą zestawów łożyskowych o podwyższonej sztywności zmontowanych z naprężeniem wstępnym. Tak opracowana konstrukcja okazała się być zarówno sztywna jak i stosunkowo lekka. Zaowocowało to dość wysoką częstotliwością drgań własnych – na poziomie kilkunastu Hz.

Trzeci stopień swobody jest to napęd ruchu liniowego wprowadzającego narzędzie w głąb ciała pacjenta. Zastosowano oryginalną konstrukcję, będącą aktualnie w trakcie patentowania. Napęd liniowy jest teleskopowy. Do ramienia jest przymocowany korpus wzdłuż którego przemieszcza się listwa. Wzdłuż listwy z kolei przemieszcza się wózek do którego zamocowany jest blok napędowy narzędzia. Ruch wózka względem listwy i listwy względem korpusu są sprzęgnięte za pomocą taśm opasujących listwę. Zaletą takiego układu przeniesienia napędu jest to, że cały czas długość przestrzeni zajmowanej przez układ jest równa długości listwy i jest w przybliżeniu dwa razy mniejsza niż zakres przemieszczenia napędu.

Oprócz walorów użytkowych dużą zaletą zaproponowanej konstrukcji jest jej zwartość i estetyka. Szerokość ramienia została ograniczona do niezbędnego minimum. W sytuacji, gdy obok siebie będą pracowały trzy ramiona ma to szczególne znaczenie przy unikaniu kolizji. Napędy poszczególnych stopni sw. są schowane wewnątrz belek a osłony na belkach zabezpieczają wszystkie elementy znajdujące się wewnątrz i ograniczają ryzyko kontuzji przez „wsadzenie palca gdzie nie trzeba”. Przewody elektryczne zostały poprowadzone kanałami wewnątrz belek, co oprócz poprawy estetyki zapewnia im osłonę mechaniczną i elektromagnetyczną.



Rys. 7. Narzędzie robota RobIn Heart 0 (10 mm średnicy) i robota RobIn Heart 1 (8mm)

Kolejnym elementem robota RobIn Heart® jest układ napędowy narzędzia i narzędzie. Narzędzie (rys. 7) składa się z ruchomych końcówek narzędziowych, kiści (dwa przeguby), długiej tulei nośnej oraz z korpusu narzędzia umożliwiającego jego podłączenie do układu napędowego. Pomiedzy korpusem narzędzia a blokiem napędowym znajduje się element zwany przekładką. W wersji podstawowej zaproponowano narzędzie o 5 st. sw. Daje to maksymalne możliwości manewrowe: 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”. Średnica narzędzia wynosi 8 mm.

W projektowanej konstrukcji zastosowano napęd cięgnowy. Cięgna znajdują się tylko w części odłączanej, co w przypadku zerwania cięgna nie powoduje awarii całego robota.

Wymiana bloku odłączanego pozwala na kontynuację operacji.

Aby zapewnić możliwość sterylizacji manipulatora została zaprojektowana konstrukcja umożliwiająca szybkie i nieskomplikowane odłączanie narzędzia od bloku napędowego kiści. Odłączona część manipulacyjna nie zawiera żadnych elementów wymagających smarowania. Zaprezentowana część napędowa kiści ma małe wymiary i bardzo zwartą konstrukcję

Sterylizacji podlega przekładka oraz narzędzie. Przekładka jest bardzo istotnym elementem w procesie wymiany narzędzia. Proces ten przeprowadza się wielokrotnie podczas operacji. Przekładka znajduje się pomiędzy częścią „brudną” i „czystą” i dzięki temu, że przed operacją została wysterylizowana, zapobiega przedostawaniu się bakterii na wysterylizowane narzędzia.

5. PODSUMOWANIE

W ramach projektu badawczego kierowanego przez prof. Zbigniewa Religę Fundacji Rozwoju Kardiochirurgii w Zabrze wykonano szereg konstrukcji w celu ich przetestowania i wyboru najlepszej koncepcji. Artykuł prezentuje wkład zespołu Politechniki Łódzkiej w konstrukcję mechaniczną dwóch prototypów. Dzięki szerokiemu frontowi prac nad konstrukcją mechaniczną udało się w efekcie końcowym uzyskać konstrukcję zapewniającą najlepsze parametry użytkowe, takie jak duży zakres ruchów, zwarta konstrukcja, wysoka sztywność, brak luzów przy jednoczesnym ograniczeniu masy ramienia do niezbędnego minimum.

Obecnie trwają badania laboratoryjne wszystkich modeli robota *Robin Heart* i przygotowany jest jego pierwszy krok na salę operacyjną – eksperyment na zwierzęciu.

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.Jezierskiemu, A.Kandorze, A.Klisowskiemu, P.Kostce, Z. Małocie, K. Mianowskiemu, S.Miderze, W.Pawłowskiemu, R.Pruskiemu, D.Sławińskiemu, A.Wróbleskiej oraz sporej grupie studentów kilku uczelni, którzy pisali prace dyplomowe i magisterskie oraz uczestniczyli w zajęciach koła naukowego.

PIŚMIENNICTWO

1. www.computermotion.com
2. www.intuitivesurgical.com
3. Z. Nawrat; L. Podśędkowski; K. Mianowski; P. Kostka; P. Wróbleski; Z.Małota; Z. Religa: Robin Heart oraz Zeus i Da Vinci – porównanie robotów kardiochirurgicznych XIII Krajowa Konferencja Naukowa. Biocybernetyka i inżynieria biomedyczna. Gdańsk, 10-13 wrzesień 2003 r. str.464-469.