

Krzysztof Mianowski
Dr inż. adiunkt
ITLiMS Politechnika Warszawska

NOWE ROZWIĄZANIE MANIPULATORA RÓWNOLEGŁEGO TYPU POLMAN DO WSPOMAGANIA OPERACJI CHIRURGICZNYCH

W pracy przedstawiono projekt manipulatora o hybrydowej strukturze (szeregowo-równoległej) schematu kinematycznego przeznaczonego do wspomagania operacji chirurgicznych metodą laparoskopową. Dokumentację projektową i modele układu mechanicznego opracowano w systemie UNIGRAPHICS, zaś modele kinematyki z wykorzystaniem programu ADAMSTM. Wykorzystanie w projektowaniu i modelowaniu konstrukcji manipulatora medycznego środowiska wirtualnego i metod symulacyjnych pozwoliło na wszechstronne przebadanie różnych właściwości oraz dobór wybranych parametrów metodami inżynierskimi już na etapie projektowania przy znacznej redukcji czasu przeznaczonego na poprawki prototypu układu mechanicznego. Opracowane rozwiązanie jest kompaktowe i zwarte i charakteryzuje się prostotą, lekkością oraz niskimi kosztami wykonania. Należy podkreślić, że przedstawiona koncepcja stanowi rozwinięcie wcześniejszych prac autora w zakresie robotycznych rekonfigurowalnych systemów modułowych i ma na celu stworzenie szerokiej gamy nowych rozwiązań manipulatorów medycznych pozwalających dobierać na różne sposoby najodpowiedniejsze zestawy układów wspomagających pracę lekarza-operatora do określonego typu operacji.

NEW SOLUTION OF PARALLEL MANIPULATOR POLMAN FOR THE ASSISTING OF SURGICAL OPERATION

New solution of hybrid (serial-parallel) manipulator for the assisting of surgical operation of laparoscopic type is presented in the paper. The desing was prepeared in UNIGRAPHICS system, while kinematic models in ADAMS program. Preliminary results of the design and initial investigations concerned with performances of the manipualor have shown, that the method is effective and adequate to problems for solving. Obtained solution has very compact form, is very light and its cost is very low. Presented concept has a modular structure and can be applied to very wide range of surgical operations.

1. WPROWADZENIE

Praca lekarza chirurga-operatora wymaga wysokiej precyzji manipulacji narzędziami chirurgicznymi, które w ostatnim czasie zostały zminiaturyzowane, wyposażone w długie cienkie wysięgniki o średnicy kilku milimetrów oraz zdalny napęd przekazywany z rąk lekarza przez specjalne uchwyty. Cechą charakterystyczną metod małoinwazyjnych jest zmniejszanie cięcia chirurgicznego i odstępianie od używania w czasie operacji krążenia pozaustrojowego. Chirurdzy dążą, aby operacje były dokonywane poprzez wprowadzanie do wnętrza ciała pacjenta narzędzi przez kilkumilimetrowe nacięcia powłok. Używane narzędzia zwane laparoskopowymi zostały powszechnie zaakceptowane przez

środowisko medyczne i pacjentów, gdyż zapewniają wysoki komfort pracy, czynią ją czystsza i wygodniejsza a pacjentom oferują mniejszą inwazyjność zabiegu, niewielkie, prawie niewidoczne blizny pooperacyjne i szybszy powrót do pełnej sprawności fizycznej i do pracy. Operowanie takimi narzędziami wymaga wytworzenia odpowiedniego pola operacyjnego i uzyskania w sposób sztuczny obrazu tego pola o wysokiej jakości zapewniającej możliwość właściwej jego interpretacji przez lekarza-operatora. W początkowym stadium rozwoju małoinwazyjnej chirurgii laparoskopowej kamerę endoskopową utrzymywał i odpowiednio nią kierował pomocnik lekarza. Wymagało to wysokiej precyzji manipulacji, podczas, gdy człowiek ten bardzo szybko się męcząc tracił właściwą kontrolę nad urządzeniem. W ostatnich kilku latach na salach operacyjnych pojawiły się automatycznie sterowane inteligentne statywy-manipulatory i roboty-telemanipulatory o wysokiej precyzji i pewności działania, które w sposób stabilny, pewny i niezawodny całymi godzinami, bez zmęczenia wypełniają podawane np. głosem polecenia lekarza-operatora wypełniając rolę automatów-asystentów. Ta nowa technika stała się obecnie bardzo atrakcyjna i bardzo dynamicznie się rozwija, jednak nie ustalono jeszcze jednolitych standardów technicznych i projektowo-konstrukcyjnych w tym zakresie i wiele zagadnień czeka nadal na efektywne rozwiązania. Można je uzyskać tylko na drodze analizy odpowiednio sformułowanych modeli uwzględniających specyfikę podejmowanych zagadnień z pogranicza anatomii, medycyny, biomechaniki i inżynierii medycznej. Niniejsza praca zawiera opis prototypowego rozwiązania manipulatora, który może zostać wykorzystany do asystowania przy operacji chirurgicznej prowadzonej metodą laparoskopową lub w konstrukcji zrobotyzowanego stanowiska do operacji chirurgicznych.

2. OGÓLNA KONCEPCJA MANIPULATORA POLMAN PRZEZNACZONEGO DO OPERACJI CHIRURGICZNYCH

Inżynier-konstruktor podejmując się opracowania nowej konstrukcji np. manipulatora do robota chirurgicznego staje przed bardzo poważnym problemem. Istnieją już co prawda rozwiązania tego typu i od kilku lat są one efektywnie wykorzystywane na salach operacyjnych, jednak jest ich niewiele a ich podstawowe cechy powodują, że lekarze wykorzystują je najczęściej jedynie do pewnych wytypowanych fragmentów operacji. Na przykład w wypadku, gdy chirurg musi zszyć naczynia krwionośne o średnicy kilku milimetrów, mając bardzo ograniczone pole operacyjne (odległość między sercem a ścianą klatki piersiowej wynosi 2 - 3 cm, dużym problemem staje się bezpośrednio operowanie narzędziami o długości prawie pół metra. Pierwsze bariery zostały już pokonane i lekarze widzą korzyści płynące ze stosowania nowej techniki, jednak dla rozszerzenia obszaru zastosowań tych robotów w praktyce medycznej potrzeba rozwoju istniejących i opracowania nowych podobnych rozwiązań. Najtrudniejszym problemem konstruktora podejmującego się opracowania systemu robotycznego przeznaczonego do wspomaganie operacji chirurgicznych jest brak fachowych informacji na temat dopiero co wdrożonych rozwiązań, które są strzeżone patentami. Z drugiej strony opracowanie nowego rozwiązania na pozór znacznie różniącego się od istniejących, w którym nawet nieświadomie stosuje się fragment mechanizmu zastrzeżony patentami przez konkurencję, może narazić potencjalnego producenta na nieprzewidziane koszty, a nawet konieczność rezygnacji z wdrożenia przemysłowego. W takiej sytuacji należy bardzo dokładnie przyglądać się istniejącym rozwiązaniom i ich opisom patentowym a w projektach wykorzystywać w największym jak to się da zakresie sprawdzone i

niezawodne rozwiązania ogólnie znane, oraz szukać nowych, nawet bardzo drobnych ale niewykorzystywanych dotychczas w tym celu rozwiązań, które najlepiej i najefektywniej pozwolą osiągnąć cel projektowy a ponadto pozwolą zastrzec patentami lub wzorami użytkowymi nowe walory otrzymanych konstrukcji na rzecz twórcy lub producenta wdrażającego. Aby ten cel osiągnąć, warto wykorzystać walory współczesnych komputerowych metod projektowania, konstruowania (CAD/CAE) i wspomaganie produkcji (CAM) oraz nowe techniki i nowoczesne technologie produkcyjne.

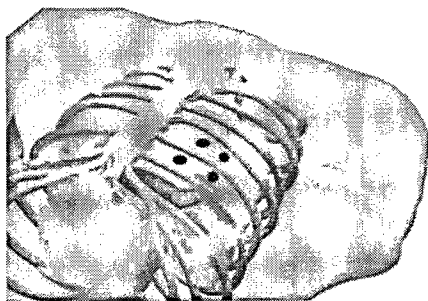
W pracach nad opracowaniem pierwszego polskiego robota kardiochirurgicznego RobIn Heart autor niniejszego opracowania podjął decyzję, aby wraz z grupą studentów wykonujących prace przejściowe i dyplomowe, jak najefektywniej wykorzystać istniejącą na Wydziale MEiL Politechniki Warszawskiej infrastrukturę komputerową, zarówno sprzętową jak i programową, dla przygotowania zaplecza naukowego i badawczego mającego służyć do rozwiązywania zadań projektowych zrobotyzowanych systemów przeznaczonych do wspomaganie operacji chirurgicznych w sposób kompleksowy.

W ramach tych prac opracowano kilka projektów i wykonano wybrane prototypy manipulatorów specjalnych dedykowanych zastosowaniom do prowadzenia operacji chirurgicznych. Zawierają one w swojej konstrukcji płaskie mechanizmy równoległowodowe o specjalnych własnościach zapewniające przestawianie (w płaszczyźnie ruchu) osi obrotu członu wyjściowego względem wejściowego. Oznacza to, że możliwa jest realizacja obrotu członu wyjściowego takiego mechanizmu względem osi (geometrycznej) związanej z członem wejściowym ale nie należącej do żadnego elementu mechanizmu lecz ułożonej zupełnie poza jego obrębem. Mechanizmy takie są szczególnie przydatne w konstrukcji manipulatorów robotów chirurgicznych, gdyż pozwalają one obracać elementem wysięgnikowym narzędzia laparoskopowego (którego ruch zapewnia jednocześnie ruch roboczy końcówki wewnątrz ciała pacjenta) względem punktu charakterystycznego związanego z tzw. portem laparoskopowym, przy czym nie zachodzą kolizje między manipulatorem z narzędziem a powłokami ciała pacjenta, podczas gdy konstrukcja jest zwarta i obejmuje stosunkowo mały obszar przestrzeni. Warto nadmienić, że mechanizmy równoległowodowe pozwalają np. na realizację ruchu członu wyjściowego jako ruchu translacyjnego po okręgu. Powoduje to możliwość ekwidystalnego przeniesienia tego ruchu na dowolną odległość i w dowolnym kierunku od punktów rzeczywistego obrotu na korbach mocujących. Oczywiście każdy punkt członu wyjściowego posiada swój własny bezwzględnie stały środek obrotu. Taka własność pojedynczego równoległowodu poprzez odpowiednie sprzężenie go z drugim równoległowodem zamocowanym na końcu pierwszego pozwala na zbudowanie mechanizmów specjalnych, o osi obrotu członu wyjściowego ułożonej poza mechanizmem. Tak więc mechanizmy równoległowodowe pozwalają przesuwac (offsetować) chwilowe osie obrotu wybranych członów i ustalać je w przestrzeni względem innych wskazanych członów składowych, np. członu podstawy i członu wyjściowego. Połączenie takiego mechanizmu z szeregowo połączonym mechanizmem obrotu ułożonym na podstawie pozwala na uzyskanie mechanizmu sferycznego, w którym punkty członu wyjściowego poruszają się po współśrodkowych powierzchniach sferycznych. Aby jak najlepiej ukształtować własności nowoprojektowanych mechanizmów manipulatorów opracowano ich sparametryzowane modele komputerowe i za ich pomocą, z wykorzystaniem środowiska wirtualnego uwzględniającego własności rzeczywistego pola operacyjnego, „dopasowano” własności manipulatorów do przewidywanych zadań.

3. ZAŁOŻENIA OGÓLNE PROJEKTU MANIPULATORA CHIRURGICZNEGO POLMAN.

Założono, że robot stanowiący element nośny dla narzędzia chirurgicznego musi posiadać minimum trzy stopnie swobody – dwa obroty względem osi prostopadłych do siebie oraz jeden przesuw równoległy do osi narzędzia. Przestrzeń, w której pracuje powinna zawierać się w prostopadłościąnie o wymiarach 600x600x300mm i powinien być zdolny do przeniesienia obciążeń rzędu 10N przyłożonych do końcówki narzędzia zamocowanego do robota. Wyniki wcześniejszych prac pokazały, że w konstrukcji manipulatora korzystnym jest wykorzystanie mechanizmów równoległowodowych. Takie rozwiązanie pozwala uzyskać odpowiednią sztywność całej konstrukcji oraz precyzję pozycjonowania. W ten sposób łatwiej jest również zapewnić mechanicznie warunek stałopunktowości, czyli możliwość uzyskania odpowiedniej orientacji narzędzia względem stałego punktu znajdującego w miejscu przechodzenia przez powierzchnię ciała pacjenta. Pozwala to zminimalizować obciążenie portów. Manipulator ma składać się z trzech połączonych ze sobą mechanizmów. Dwa z nich zapewniające ruchy obrotowe będą razem realizowały ruch sferyczny a trzeci mechanizm zapewnia ruch prostoliniowy. Ze względu, iż projekt jest traktowany jako studium zrezygnowano z projektowania osłon. W docelowym projekcie konstrukcję wraz z osłonami należy zbudować z materiałów umożliwiających dezynfekcję po wykonanym zabiegu.

Na Rys. 1. pokazano stworzony do celów projektowych wirtualny model klatki piersiowej ciała pacjenta z płucami, workiem osierdziowym, sercem, mostkiem i żebrami.

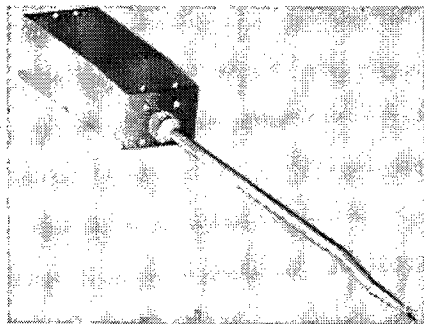


Rys. 1. Wirtualny model klatki piersiowej z narządami wewnętrznymi otrzymany z pomiarów i zaimplementowany w systemie UNIGRAPHICS.

4. PROJEKT MANIPULATORA HYBRYDOWEGO POLMAN.

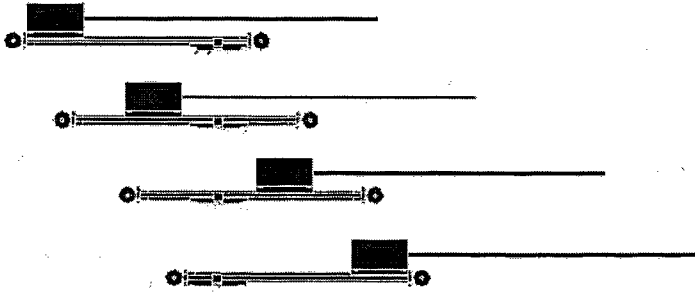
Korzystając z doświadczeń zdobytych we wcześniejszych pracach zauważono, że najistotniejszym fragmentem konstrukcji decydującym o właściwościach projektowanego manipulatora jest zakładany stan obciążeń końcówki narzędzia, wielkość i masa narzędzia mocowanego na końcu manipulatora oraz sposób doprowadzenia napędu i sterowania do narzędzia. Należy wyraźnie zaznaczyć, że we wcześniejszych pracach założenia projektowe były formułowane na podstawie bardzo przybliżonych i nieprecyzyjnych danych o stanie otoczenia robota.

Jako punkt wyjścia do projektu założono, że stosowane narzędzie będzie składało się ze skrzynki napędowej o masie nie przekraczającej 300g z wysięgnikiem narzędziowym stalowym o długości do 320mm i średnicy do 8mm. Przykładowe rozwiązanie takiego narzędzia pokazano na Rys. 2. W projekcie założono, że projektowana konstrukcja ma być jak najmniejsza i jak najlżejsza, skąd wynika, że np. elementy konstrukcyjne i mechanizmy będą maksymalnie ociążane z możliwością wysprzęglania przy nadmiernych obciążeniach. Obciążenia końcówki narzędziowej ograniczono do 10N na dowolnym kierunku w przestrzeni. Przyjęto, że dla zapewnienia minimalnej masy urządzenia najlepszym rozwiązaniem będzie konstrukcja hybrydowa o szeregowo-równoległej strukturze schematu kinematycznego. Ponieważ minimum masy konstrukcji odpowiada warunkowi naprężeń granicznych, więc o wymiarach konstrukcyjnych bieżącego fragmentu konstrukcji odpowiadają obciążenia końcówki oraz siły ciężkości kolejnych fragmentów za rozważanym przekrojem. W tej sytuacji konstrukcję zwymiarowano w ten sposób, że rozpoczynając od końcówki narzędzia, wyznaczano obciążenia i naprężenia w bieżących przekrojach i nadawano im odpowiednie wymiary, przy czym uwzględniano niezbędne funkcje danego fragmentu. Uznano, że bardzo ważnym jest zaprojektowanie jak najlżejszej prowadnicy liniowej narzędzia, która stanowi końcowy fragment manipulatora. Zakres przesuwu tego mechanizmu wynosi 0,32 m. W projekcie wykorzystano koncepcję mechanizmu zastosowanego w prototypie robota RobIn Hart 2, dokonano jednak jego modyfikacji w celu zmniejszenia rozmiarów poprzecznych i masy.



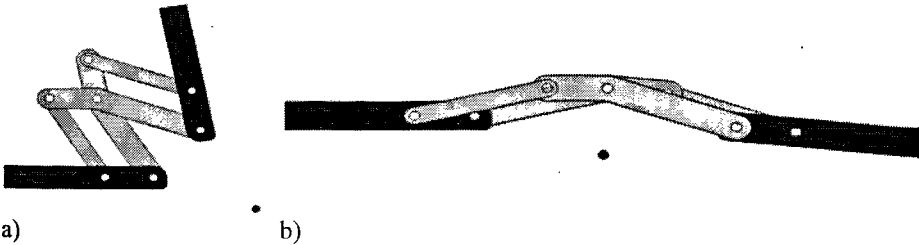
Rys. 2. Narzędzie laparoskopowe o napędzie elektrycznym realizujące ruch poprzeczny końcówki jako kombinację ruchów obrotowych.

Mechanizm liniowy działa w ten sposób, że na ruchomym korpusie wzdłużnym z zamontowanymi na stałe dwoma prowadnicami liniowymi kulkowymi poruszają się w przeciwnych kierunkach dwa wózki sprzężone ze sobą kinematycznie za pomocą zamkniętej pętli taśmy metalowej przewiniętej wokół rolek na końcach korpusu. Między prowadnicami znajduje się zębata liniowa, będąca elementem układu napędowego mechanizmu. Wózek dolny jest nieruchomy i posiada silnik napędowy z kółkiem zębatym zazębionym z zębatką. Podczas obracania się silnika zębata przesuwana się wraz z korpusem względem wózka, natomiast pętla taśmy powoduje przesuw drugiego wózka po prowadnicy korpusu przy czym przemieszczenie wózka drugiego względem wózka podstawy jest dwa razy większe niż przemieszczenie korpusu względem podstawy. Sposób pracy prowadnicy pokazano na Rys. 3.



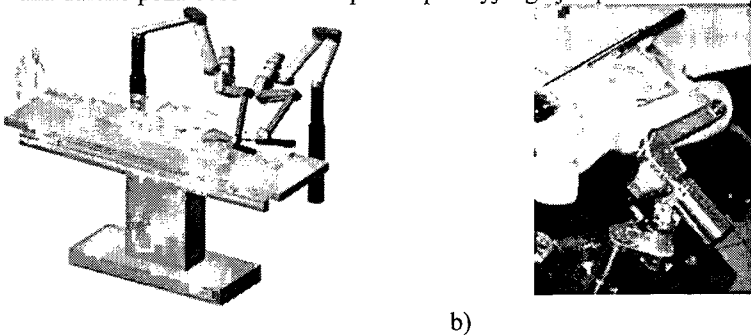
Rys. 3. Zasada pracy mechanizmu przesuwu liniowego narzędzia.

Zasadę pracy mechanizmu realizującego obrót narzędzia względem stałej osi leżącej poza obrębem mechanizmu wyjaśniono na Rys. 4. Zaznaczony punkt reprezentuje tu oś obrotu.



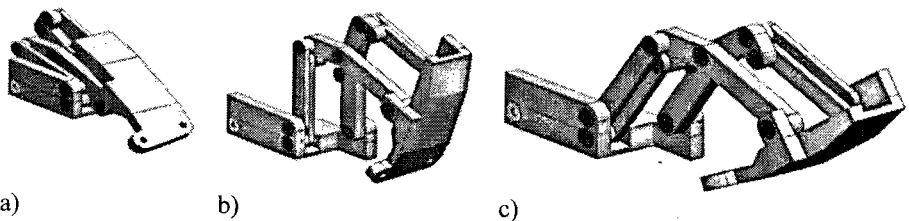
a) b)
Rys. 4. Zasada pracy mechanizmu w którym człon wyjściowy obraca się względem osi leżącej poza obszarem mechanizmu.

W dotychczasowych rozwiązaniach mechanizm manipulatora był realizowany przez połączenie obrotu pierwszego stopnia swobody z mechanizmem jak w [5] co powodowało, że układ ramienia manipulatora był duży i ciężki, gdyż pierwsza oś musiała być lokowana daleko poza obszarem tzw. portu operacyjnego jak pokazano na Rys. 5.



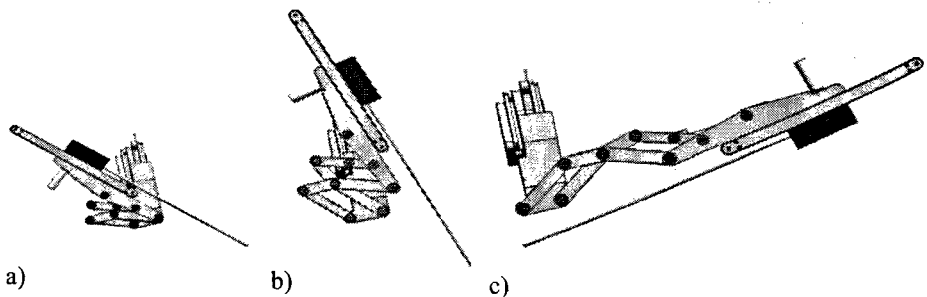
a) b)
Rys. 5. Manipulator RobIn Heart 2 na stanowisku operacyjnym.

W opisywanym rozwiązaniu założono, że mechanizm obrotu względem osi pierwszej zostanie zbudowany na wzór mechanizmu wykorzystywanego dla drugiego stopnia swobody. W ten sposób dwa pierwsze stopnie skonstruowane z wykorzystaniem mechanizmów o strukturze równoległej stanowią manipulator stałopunktowy o punkcie stałym leżącym poza obrębem mechanizmu. Pozwala to na znaczne zmniejszenie wymiarów i masy ogólnej manipulatora. Dołączenie mechanizmu liniowego daje w wyniku układ kinematyczny o kulistym ruchu punktu końcowego. Manipulator zbudowany według takiej zasady działania pozwala na wprowadzanie związanego z jego członem końcowym (wyjściowym) narzędzia laparoskopowego przez otwór portu do ciała pacjenta, przy czym punkt stały mechanizmu jest w trakcie ustawiania manipulatora na stanowisku operacyjnym sytuowany na przecięciu osi portu laparoskopowego z płaszczyzną powierzchni ciała pacjenta. W przyjętym rozwiązaniu mechanizm dla realizacji pierwszego stopnia swobody został odpowiednio zmodyfikowany w ten sposób, że uzyskano odpowiednio duży zakres kątowy tego ruchu. Uzyskano to przez dołączenie w specjalny sposób trzeciego łącznika pozwalającego na eliminację strefy martwej w okolicy położenia osłobliwego. Rozwiązanie to pokazano na Rys. 6. Uzyskano kompaktowy mechanizm, który może realizować kąt obrotu do 180° .



Rys.6. Mechanizm pierwszego stopnia swobody przy różnych kątach obrotu

Na mechanizm drugiego stopnia swobody zastosowano mechanizm według Rys. 4. Na Rys. 7 pokazano zespół mechanizmów drugiego i trzeciego stopnia swobody.

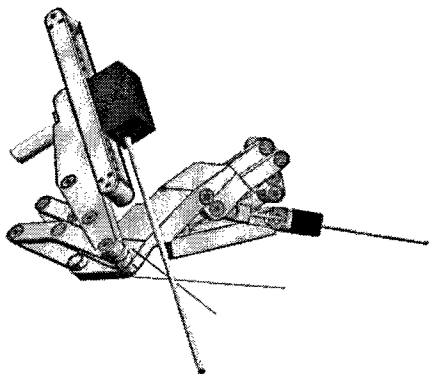


Rys. 7. Mechanizmy drugiego i trzeciego stopnia swobody

W konstrukcji zastosowano nowoczesne rozwiązania konstrukcyjne układów transmisyjnych z równoległowodami własnej konstrukcji oraz lekkie człony wykonane z duraluminium, zapewniające dużą sztywność rozwiązania. Człony manipulatora są łożyskowane między sobą za pomocą lekkich cienkościennych łożysk. W wyniku otrzymano lekki, dobrze sterowalny manipulator o relatywnie małych wymiarach i o wysokich własnościach kinematycznych i funkcjonalnych, który może być napędzany za

pomocą silników elektrycznych małej mocy. Przestrzeń robocza manipulatora jest odpowiednio wyciętym fragmentem kuli. Manipulator ten może być wykorzystany zarówno do wspomagania operacji prowadzonej laparoskopowo przez lekarza, jak i w konstrukcji robota chirurgicznego.

Uzyskane rozwiązanie końcowe pokazano na rys. 8.



Rys. 8. Hybrydowy manipulator stałopunktowy (kulisty) POLMAN do operacji chirurgicznych - widok ogólny,

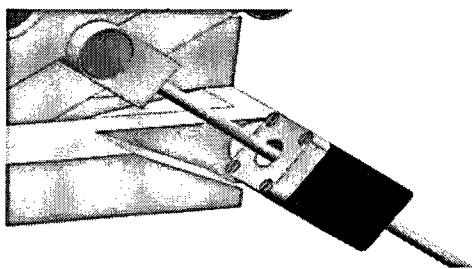
Obszar przestrzeni roboczej takiego manipulatora wynika z zakresów ruchów na poszczególnych stopniach swobody, i wynosi:

Pierwszy stopień swobody $\alpha=180^{\circ}$

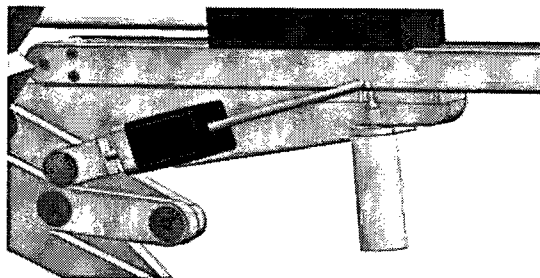
Drugi stopień swobody ma zakres obrotu 150° względem osi prostopadłej do osi pierwszej w punkcie zaznaczonym na rysunku (poza obszarem mechanizmu).

Mechanizm prostoliniowy pozwala na ruch narzędzia po linii prostej na odległość $l=320\text{mm}$ (zmiana promienia).

Do napędu zarówno pierwszego jak i drugiego stopnia swobody przewidziano silniki elektryczne małej mocy z przekładniami śrubowymi. Szczegóły rozwiązania pokazano na Rys. 9 i 10.



Rys. 9. Siłownik śrubowy w układzie napędu mechanizmu pierwszego stopnia swobody.



Rys. 10. Siłownik śrubowy w układzie napędu mechanizmu drugiego stopnia swobody.

Analizę funkcjonalności przeprowadzono w programie ADAMS[®]. W tym celu wykorzystano model bryłowy z UNIGRAPHICS'a, który w formie „parasolid” przeniesiono do ADAMS'a. Badania wykazały, że manipulator zapewnia możliwość dotarcia końcówką narzędzia do dowolnego punktu przestrzeni roboczej (wewnątrz ciała pacjenta), jednak właściwości kinematyczne i w szczególności dokładnościowe zmieniają się w zakresie przestrzeni roboczej.

Pełną dokumentację manipulatora opracowano w systemie UNIGRAPHICS, co pozwoliło na wprowadzanie różnych poprawek w konstrukcji już na etapie projektowania oraz wizualizowanie typowych zadań i właściwości, które trudno zrealizować nawet na prototypie.

Narzędzia takie jak UNIGRAPHICS i ADAMS pozwoliły w prosty i szybki sposób na dokonanie weryfikacji opracowywanego rozwiązania. Należy podkreślić, że opracowany manipulator pozwala w łatwy sposób na opracowanie scenariusza „operacji wirtualnej”, której wyniki mogą stanowić zarówno dla inżyniera-konstruktora jak i lekarza-operatora inspirujące źródło dodatkowej wiedzy o zachowaniu się całego systemu, jak i sposobach planowania operacji.

Opracowany manipulator z uwagi na niewielkie wymiary i małą masę może być łatwo montowany ręcznie od stołu operacyjnego. Z badań symulacyjnych wynika, że dwa manipulatory można łatwo ustawić nad polem operacyjnym w ten sposób, aby zapewnić miejsce na trzeci manipulator z endoskopem.

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Wykorzystanie modeli wirtualnych w projektowaniu manipulatora medycznego pozwoliło nie tylko na dokładne dopasowanie podstawowego schematu kinematycznego manipulatora i dobór wymiarów geometrycznych do przewidywanych zadań, ale również umożliwiło ukształtowanie własności kinematycznych i w zakresie przewidywanej dokładności adekwatnie do stawianych wymogów dla przewidywanych zadań. Opracowane modele komputerowe okazały się bardzo użytecznym narzędziem dla projektanta-konstruktora manipulatora w szczególności wspomagającym niezbędne procesy decyzyjne. Model robota jest sparametryzowany, więc możliwe było badanie własności różnych wersji jego rozwiązania. Opracowana koncepcja manipulatora medycznego o trzech stopniach swobody charakteryzuje się wysokimi własnościami kinematycznymi i w zakresie dokładności. Manipulator ma kompaktową konstrukcję modułową i relatywnie duży zakres przestrzeni roboczej, wykonany na podstawie modeli komputerowych mechanizm charakteryzuje się dobrymi własnościami mechanicznymi. Konstrukcja ma właściwości modułowe i uzyskane moduły mogą być wykorzystane w

opracowywaniu różnych wersji rozwiązań przeznaczonych do obsługi różnych operacji. Elementy ruchome są lekkie i możliwe jest zastosowanie elektrycznego napędu bezpośredniego dla podwyższenia ich własności mechanicznych i funkcjonalnych.

Podziękowania

Praca powstała w ramach prac własnych w Instytucie Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej na Wydziale MEiL w Politechnice Warszawskiej w 2005 roku.

Literatura:

- [1] Witold Sylwanowicz – Mały Atlas Anatomiczny. Państwowy Zakład Wydawnictw Lekarskich, 1987.
- [2] Fundacja Rozwoju Kardiologii – Robot Kardiochirurgiczny - Polski Projekt. Wstępne założenia projektowe, Zabrze 2001.
- [3] Chirurgia laparoskopowa, praca zbiorowa pod red. W. Kostewicza, PZWL, Warszawa 2002,
- [4] Zbigniew Nawrat „Polski robot kardiochirurgiczny; strategia rozwoju prac badawczo-konstrukcyjnych” Symposium „Roboty Kardiochirurgiczne 2000” Zabrze, 12 grudnia 2000 r.
- [5] Z. Nawrat, L. Podsedekowski, K. Mianowski, P. Wróblewski, P. Kostka, M. Baczyński, Z. Małota, G. Granosik, E. Jezierski, A. Wróblewska, Z. Religa: RobIn Heart in 2002 – actual state of polish cardio-robot project. Międzynarodowa Konferencja Robotyków RoMoCo, Konferencja IEEE. październik 2002
- [6] Prace przejściowe i dyplomowe wykonane w latach 2002-2005 pod kierunkiem K. Mianowskiego przez studentów kierunku Automatyka i Robotyka na Wydz. MEiL PW.
- [7] M. Witkowski: Studium projektowe manipulatora nośnego dla robota do chirurgii narządów wewnętrznych, praca dyplomowa na Wydz. MEiL PW, Warszawa, 2006.