

Studium projektowe robota diagnostycznego do zastosowań w procedurze biopsji stercza

Design study of a diagnostic robot for applications in the prostate biopsy procedure

Artykuł recenzowany

**RADOSŁAW
PRASKI¹,
KRZYSZTOF
MIANOWSKI²**

¹ Wydział Mechaniczny
Energetyki i Lotnictwa
Politechniki Warszawskiej,
² Instytut Techniki Lotniczej
i Mechaniki Stosowanej
Politechniki Warszawskiej

Słowa kluczowe:
robotyka medyczna,
choroby nowotworowe
gruczołu krokowego,
manipulator medyczny,
rezonans magnetyczny, prostata

Key words:
medical robotics

Streszczenie

Aktualnie robotyka medyczna jest najbardziej dynamicznie rozwijającą się dziedziną robotyki usługowej. Wiąże się to z coraz większym zainteresowaniem tą dziedziną jej potencjalnych twórców – naukowców-inżynierów jak i potencjalnych użytkowników – lekarzy-operatorów. Podejmuje się prace badawczo-wdrożeniowe dotyczące nowych rozwiązań robotów, które pomogą usprawnić różne procesy medyczne związane z diagnostyką medyczną, chirurgią oraz rehabilitacją w celu poprawienia jakości, efektywności i warunków pracy lekarzy oraz zwiększenia komfortu pacjentów. Biopsja prostaty wykonywana jest w celu pobrania zmienionej chorobowo tkanki miękkiej tego gruczołu w celu przeprowadzenia jej dalszych analiz. Wykonywana tradycyjnymi sposobami jest procesem trudnym i długotrwałym oraz często przez swoją ograniczoną precyzję nie daje pożądanych efektów, ponadto częstokrotnie bywa bardzo bolesna dla pacjenta. Wprowadzenie do tego procesu zrobotyzowanego narzędzia daje możliwość zwiększenia dokładności prowadzenia zabiegu i znacznego skrócenia czasu zabiegu. Łącząc manipulator z aparatem do rezonansu magnetycznego, dostajemy zautomatyzowane stanowisko, umożliwiające zdalne prowadzenie zabiegu biopsji stercza w czasie rzeczywistym.

W pracy podjęto próbę opracowania projektu zrobotyzowanego narzędzia diagnostycznego przeznaczonego do obsługi procedury biopsji gruczołu krokowego. Trajektoria ruchu manipulatora jest planowana i realizowana przy wykorzystaniu obrazowania metodą rezonansu magnetycznego, przy czym informacje o przebiegu procedury są w czasie rzeczywistym przetwarzane na informacje bezpośrednio dostępne dla lekarza prowadzącego zabieg. Przytoczono medyczny opis typowej procedury diagnos-

tycznej badania gruczołu krokowego oraz przebieg takiej procedury z wykorzystaniem obrazowania wykorzystującego metodę rezonansu magnetycznego. W celach porównawczych opisano również przykładowe istniejące konstrukcje takich robotów. Na podstawie danych literaturowych oraz analiz procedur diagnostycznych sformułowano założenia własnego projektu robota medycznego do wspomagania procedury biopsji prostaty. Praca dyplomowa magisterska miała w głównej mierze charakter konstrukcyjny. Opracowano schemat kinematyczny manipulatora o pięciu stopniach swobody oraz sformułowano jego model kinematyczny. Z uwzględnieniem typowych warunków pracy robota opracowano projekt wstępny i przeprowadzono analizę jego modelu dynamiki oraz wykonano badania wytrzymałościowe wyróżnionych elementów konstrukcji do wykorzystania w projekcie konstrukcyjnym. Uwzględniono też warunki pracy układu sterowania oraz współpracy robota z aparatem do rezonansu magnetycznego i dobrano materiały konstrukcyjne pozwalające na pracę w środowisku o bardzo wysokim poziomie indukcji magnetycznej. Opracowano modele komputerowe kinematyki i wykonano symulacje podstawowych procedur pracy. Na tej podstawie sporządzono charakterystyki do oceny końcowej projektu. Pracę kończy krótkie podsumowanie oraz wnioski, sformułowano też plany na przyszłość oraz perspektywy dalszych badań nad projektem.

Abstract

Currently, medical robotics is the most dynamically developing field of service robotics. This is associated with the growing interest of this field of its potential creators - scientists-engineers and potential users - doctors-operators. Undertaken research and implementation works on new robot solutions that will help streamline various medical processes related to medical diagnostics, surgery and rehabilitation in order to improve the quality, efficiency and working conditions of doctors and increase the comfort of patients. Prostate biopsy is performed to collect diseased soft tissue of this gland for further analysis. Performed in traditional ways is a difficult and long-lasting process and often because of its limited precision does not give the desired effects, moreover, it is often very painful for the patient. Introduction of a robotic tool to this process gives the opportunity to increase the accuracy of and significantly reduce the time of the procedure. By combining the manipulator with the magnetic resonance apparatus, we get an automated position en-

abling remote manipulation of the prostate biopsy in real time. The paper attempts to develop a project of a robotic diagnostic tool designed to support the prostate biopsy procedure. The trajectory of manipulator movement is planned and implemented using magnetic resonance imaging, while the information about the course of the procedure is processed in real time into information directly available to the treating physician. A medical description of a typical diagnostic procedure for prostate examination and the course of such a procedure with the use of imaging using the magnetic resonance method were quoted. For comparison purposes, examples of existing designs of such robots are also described. On the basis of literature data and analysis of diagnostic procedures, the assumptions of the own medical robot project to support the prostate biopsy procedure were formulated. The Master's thesis was mainly of a constructional nature. A kinematic scheme of the manipulator with five degrees of freedom was developed and its kinematic model was formulated. Taking into account the typical working conditions of the robot, a preliminary design was developed and an analysis of its dynamics model was carried out and strength tests of the highlighted construction elements for use in the robot design were carried out. The operating conditions of the control system and cooperation of the robot with the magnetic resonance apparatus are also taken into account and construction materials have been selected that allow working in an environment with a very high level of magnetic induction. Computer models of kinematics were developed and simulations of basic work procedures were performed. On this basis, the characteristics were prepared for the final evaluation of the project. The work ends with a brief summary and conclusions, plans for the future and prospects for further research on the project have been formulated.

■ WSTĘP

Zastosowanie robotów-manipulatorów w medycynie w ostatnim czasie systematycznie rośnie, gdyż zapewnia większą wygodę i usprawnia pracę lekarza oraz w znacznym stopniu zmniejsza nakłady ogólne. Roboty medyczne wykorzystuje się do [18]:

- asystowania w zabiegach chirurgicznych,
- do obsługi szpitalnej,
- w rehabilitacji.

Najważniejszą zaletą stosowania zrobotyzowanych technik operacyjnych jest mała inwazyjność operacji oraz wysoka dokładność i efektywność prowadzonych zabiegów. Wymaga to jednak odpowiedniej diagnostyki, właściwego planowania operacji, sprawnego prowadzenia zabiegów i odpowiednio dobranej terapii. Początkiem zmian w tym zakresie było wprowadzenie do operacji chirurgicznych komputerowo wspomaganym technik obrazowania, interaktywnego korzystania z baz wiedzy i komputerowo wspomaganym metod operacyjnych oraz sterowania narzędziami z wykorzystaniem mikroprocesorowych układów sterowania [19]. Spowodowało to konieczność kształcenia personelu medycznego w zakresie korzystania z technik komputerowych. Niezbędna stała się znajomość zasad działania komputera i jego urządzeń peryferyjnych, w tym medycznych, oraz umiejętność korzystania z metod wymiany danych w układach człowiek-maszyna. Aktualnie do asystowania w operacjach chirurgicznych stosuje się różnego rodzaju telemanipulatory [20, 21] oraz urządzenia lokalizujące, w zakresie obsługi szpitalnej roboty i manipulatory służące do transportu i obsługi pacjentów, natomiast w rehabilitacji stosuje się zrobotyzowane stanowiska badawcze i rehabilitacyjne oraz manipulatory stałe lub montowane na wózkach inwalidzkich. Zastosowanie zdalnie sterowanych robotów i telemanipulatorów w chirurgii stało się możliwe w ostatnich latach dzięki dynamicznemu rozwojowi komputerowych metod tworzenia obrazów (imaging methods). Metody te są wykorzystywane zarówno w procesie diagnostycznym jak i przy prowadzeniu operacji. Do celów diagnostycznych wykorzystuje się tomografię komputerową i rezonans magnetyczny. Uzyskana w ten sposób informacja diagnostyczna, dotycząca np. wielkości, położenia i usytuowania rozpoznawanego schorzenia staje się podstawowym elementem składowym dokumentacji medycznej (np. w postaci taśmy wideo) i pozwala na planowanie operacji przez zespół operacyjny z odpowiednim wyprzedzeniem. Metody te pozwalają także na przesyłanie obrazów na duże odległości z wykorzystaniem INTERNET'u nawet w czasie rzeczywistym, co pozwala na rozszerzenie konsylium lekarskiego, wykorzystanie wiedzy szerszego gremium medycznego i ma duże znaczenie dydaktyczne. Uzyskane metodami tomograficznymi

trójwymiarowe obrazy można w prosty sposób porównywać ze standardowymi obrazami stworzonymi w opracowanych tymi samymi metodami nowoczesnych atlasach anatomicznych. Zarówno diagnoza jak i planowanie leczenia przed operacją jest w tym wypadku znacznie uproszczone i daje lepsze rokowania.

Nowotwór prostaty jest jednym z najczęściej występujących z rodzajów nowotworów u mężczyzn. Większość przypadków dotyczy dojrzałych mężczyzn, przeważnie powyżej 60 lat. Wykrywalność tej postaci raka znacznie wzrosła w przeciągu ostatnich 10 lat, może to być związane ze starzeniem się populacji ludzkiej [4]. Koniecznym staje się więc prawidłowa hospitalizacja w przypadku zmian nowotworowych oraz jak najwcześniejsze wykrycie wystąpienia raka prostaty. Im wcześniej wykryte jest stadium niepożądanym zmian chorobowych, tym większa istnieje możliwość skutecznego leczenia [5]. Kluczowym staje się więc znalezienie jak najskuteczniejszej metody wykrywalności raka gruczołu krokowego.

Obrazowanie rezonansem magnetycznym (*ang. MRI – Magnetic Resonance Imaging*) pozwala na uzyskanie wysokiej jakości zdjęć tkanek miękkich wybranych przekrojów ciała ludzkiego. W przypadku niektórych nowotworów jest to jedna z najlepszych metod poszukiwania zmian chorobowych oraz wykrywania anomalii w strukturze podatnych na nie gruczołów czy organów [4]. Aby ostatecznie zweryfikować występowanie raka oraz określić fazę jego rozwoju konieczne jest zastosowanie inwazyjnej procedury biopsji, w tym wypadku wobec gruczołu krokowego. Od strony technicznej jest to pobranie materiału biologicznego w celu przeprowadzenia dalszych badań [1-3]. Mając na uwadze powyższe, poszukuje się rozwiązań łączących oba procesy diagnostyczne. Taka metodyka nazywana jest biopsją kierowaną rezonansem magnetycznym (*ang. MRGB – MR Guided Biospy*). Choć w swojej podstawowej formie nie są procedurami wykonywanymi jednocześnie, stały rozwój technologii pozwala unowocześnić to podejście [6].

Celem pracy jest przedstawienie projektu zrobotyzowanego stanowiska do poboru zmienionej chorobowo tkanki miękkiej gruczołu krokowego, na potrzeby prowadzenia dalszych badań, na wypadek występowania nowotworu. Projekt dotyczy konstrukcji manipulatora medycznego, z wykorzystaniem którego możliwe będzie zdalne prowadzenie zabiegu biopsji prostaty, przez lekarza chirurga, wspomagane obrazowaniem rezonansu magnetycznego w czasie rzeczywistym.

Podstawowym problemem do rozwiązania w niniejszej pracy jest propozycja konstrukcji robota chirurgicznego omijająca ograniczenia krytyczne nakładane na współpracę typowych mechanizmów czy maszyn z rezonansem magnetycznym. Rezonans

działa z wykorzystaniem silnego pola magnetycznego, które stosunkowo łatwo może ulec zakłóceniu przez występowanie pewnych urządzeń zewnętrznych. Istnieje przez to konieczność wyboru bezpiecznych materiałów, napędów, czujników oraz układu sterowania. Rozbudowana struktura kinematyczna manipulatora zakłada możliwość omijania niektórych elementów układu moczowo-płciowego pacjenta. Skutkiem tego niezbędne staje się dostosowanie proponowanej konstrukcji tak, aby swobodna manipulacja występowała w obszarze pracy o kształcie wycinka cylindra o promieniu 30 cm i wysokości 40 cm. Wszystkie warunki muszą być zrealizowane wspólnie z poprawną formą konstrukcyjną. Prostota kinematyczna, wytrzymałość strukturalna i odpowiednia stateczność konstrukcji są równie mocno pożądanymi aspektami projektu.

Motywy podjęcia problematyki przez autora są złożone. Głównym bodźcem były możliwości oraz potrzeby rozwoju medycznej diagnostyki nowotworowej przy wykorzystaniu nowoczesnych technologii. Wiąże się to bezpośrednio z chęcią pomocy potencjalnym pacjentom. Interesujący jest również nowatorski charakter pracy. Dodatkowym uzasadnieniem podjęcia tematu jest brak tego typu rozwiązań na polskim rynku medycznym.

■ BIOPSJA STERCZA

W celu zbadania stercza na obecność komórek rakowych początkowym etapem jest zastosowanie rozpoznania antygenu gruczołu krokowego (*ang. PSA – Prostate Specific Antygen*) oraz badania per rectum (*ang. DRE – Digital Rectal Examination*). Testy te mogą być przeprowadzane razem bądź osobno. Docelowo przeprowadzane jest również badanie ultrasonograficzne przez kanał odbytniczy (*ang. TRUS – transrectal ultrasound*). W przypadku podwyższonego współczynnika przy badaniu PSA lub niezwykajnym wynikiem badania DRE, kolejny etap przewiduje biopsję stercza [7, 9].

Biopsja prostaty jest wykonywana według dwóch głównych procedur. Biopsja odbytnicza odbywa się na pacjencie leżącym na boku ze zgiętymi nogami przy wspomaganiu ultrasonografu, a igła jest wprowadzana od odbytu. Zwykle wykorzystywane są igły biopsyjne o kalibrze 18. Jest to podstawowy sposób wykonywania biopsji jednak występuje tu prawdopodobieństwo zakażenia prostaty [9, 10]. Biopsja kroczoza jest wykonywana na pacjencie leżącym w pozycji litotomijnej. Igła jest wprowadzana powyżej odbytu, w pobliżu środka ścięgien kroczozych aż do osiągnięcia wybranej strefy stercza. W tego rodzaju pobraniu tkanek precyzja umieszczenia igły jest osiągnięta dzięki szablónowi do brachyterapii [9, 10].

Podstawową formą wspomagania procedury biopsji stercza jest wykorzystanie ultrasonografu.

Ultrasonograf ma za zadanie przekazać obraz gruczołu krokowego, ewentualne umiejscowienie ogniska nowotworu oraz wspomóc wprowadzanie igły biopsyjnej. Forma ta jest wykorzystywana zarówno w procedurze biopsji przezodbytniczej jak i również kroczozej. W przypadku biopsji przezodbytniczej igła jest przymocowana do ultrasonografu [9][16], natomiast w przypadku biopsji kroczozej igła jest prowadzona równolegle do ultrasonografu.

Coraz częściej rozwijaną formą wspomagania procedury biopsji jest wykorzystanie rezonansu magnetycznego (*ang. MRGB – MR guided biospy*). MRGB występuje w dwóch etapach. Pierwszym jest diagnostyka występowania potencjalnych ognisk rakowych, w drugim uzyskane wyniki wykorzystuje się do przeprowadzenia docelowej procedury biopsji gruczołu krokowego. Ten rodzaj wspomagania wykorzystywany jest w procedurach przezodbytniczej oraz kroczozej przy użyciu specjalnych przyrządów [6].

Obrazowanie rezonansem magnetycznym (*ang. MRI – magnetic resonance imaging*) jest formą zobrazowania tkanek miękkich ludzkiego ciała. Rezonans w swoim działaniu wykorzystuje silne pole magnetyczne oraz fale o częstotliwości radiowej [11].

Zastosowanie obrazowania rezonansem magnetycznym posiada szereg zalet [12]:

- Wysoka jakość zdjęć badanego miejsca, bardzo dobra jakość kontrastowa tkanek miękkich,
- Możliwość otrzymania obrazów w różnych płaszczyznach,
- Brak promieniowania jonizującego, mogącego oddziaływać na pacjenta.

Przeprowadzanie testów przy użyciu rezonansu magnetycznego posiada również wady, do których należy zaliczyć przede wszystkim wysoki koszt badania oraz ograniczenia wykonania badania w przypadku osób z wstawionymi metalowymi przedmiotami [13].

Biopsja gruczołu krokowego wspomaganą przez rezonans magnetyczny jest obecnie mocno studiowana aby zoptymalizować samą procedurę. Podstawowe obecnie przeprowadzanie zabiegu z użyciem ultradźwięków pozwala osiągnąć prawidłowe wyniki dla pierwszej próby nie przekraczające 44%, natomiast dla drugiej próby 22%. Konsekwencją tego jest poszerzanie wiedzy odnośnie innych technik obrazowania, w tym rezonansem magnetycznym. Przy czym obecnie, jego wykorzystanie pozwala osiągnąć prawidłowość wyników na poziomie 38-59% [6].

■ PROBLEMATYKA

Mówiąc o działaniu we współpracy z rezonansem magnetycznym określone są zasady dotyczące urządzeń [8]:

- Bezpieczne (*ang. MRI Safe*) – urządzenie wykorzystywane w środowisku rezonansu magnetycz-

nego, nie powoduje dodatkowego zagrożenia dla pacjenta, może za to oddziaływać na poprawne działanie oraz jakość obrazowania diagnostycznego;

- **Kompatybilne (ang. MRI Compatible)** – urządzenie wykorzystywane w środowisku rezonansu magnetycznego jest bezpieczne oraz nie wpływa na jakość diagnostyki, a także nie powoduje niepoprawnego działania systemu.

Procedura prowadzenia biopsji gruczołu krokowego wykorzystująca pracę robota oraz rezonansu magnetycznego jest studiowana ze względu na możliwość ich jednoczesnego działania. Współpraca w czasie rzeczywistym polega na pobieraniu informacji obrazowania z rezonansu magnetycznego, a następnie pobrania zmienionej chorobowo tkanki poprzez wykorzystanie zrobotyzowanego stanowiska. W obecnie wykonywanych procedurach biopsji przez lekarza chirurga, wykorzystanie MRI jest oczywiście możliwe, natomiast cała procedura się wydłuża. Po zrobieniu zdjęcia, jest ono weryfikowane, a samo pobranie tkanki jest wykonywane manualnie, na zewnątrz skanera [14].

Przypadki wykorzystania robotów w różnych aspektach medycznych na ogół odciążają lekarza z przynajmniej części dotychczasowych obowiązków. Zastosowanie zrobotyzowanych urządzeń w medycynie zaczęto testować w chwili gdy zaistniała potrzeba polepszenia dokładności pracy chirurga [17]. W bieżącym przypadku zastosowanie robota umożliwia zaoszczędzenie czasu przeprowadzania zabiegu poprzez pracę wewnątrz skanera rezonansu magnetycznego, skraca to również czas pracy lekarza. Manipulatory dają dodatkowo możliwość wprowadzenia igły biopsyjnej pod kątem, co w przypadku interwencji manualnej jest niemożliwe (przypadek dojścia kroczonego). Wynikiem tego zredukowana zostaje ilość ran pooperacyjnych. Ogranicza się przez to problemy drżenia rąk oraz zmęczenia chirurga [14].

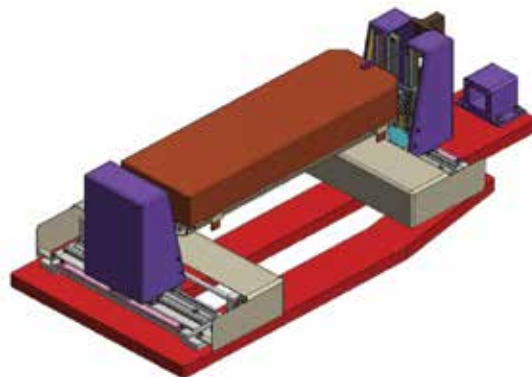
Sformułowanie własnych założeń (Tab.1.) ma kluczowy wpływ na kształt całego projektu robota. Szereg ograniczeń związany z badanym zagadnieniem jest tożsamy z poszukiwaniem nietypowych rozwiązań. Struktura robota musi zatem być dostosowana do specjalnych warunków pracy.

ROZWIĄZANIE KONSTRUKCYJNE PROJEKTU

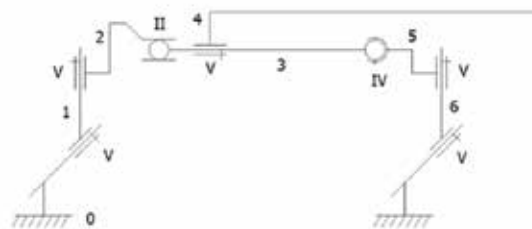
Manipulator medyczny, zaprojektowany z myślą o zdalnej procedurze biopsji gruczołu krokowego, posiada pięć stopni swobody. Obejmują one trzy ruchy translacyjne (wzdłuż osi X, Y oraz Z) oraz dwa ruchy rotacyjne (kąty pochylenia oraz odchylenia). Wybór taki podyktowany jest pokryciem możliwie jak największej miejsc prostaty oraz ominięciem miejsc, w które ingerencja jest niezalecana bądź zabroniona, m.in. cewka moczowa.

Tabela 1. Wykaz najważniejszych wytycznych projektu manipulatora medycznego (źródło: opracowanie własne).

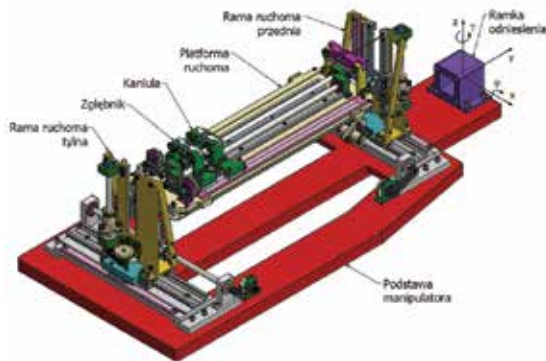
Zestawienie najważniejszych wytycznych projektu	
Funkcjonalnych	<ul style="list-style-type: none"> • Zdalny proces poboru tkanki w procedurze biopsji stercza; • Praca w środowisku rezonansu magnetycznego wspomagana obrazowaniem w czasie rzeczywistym; • Kroczyzny dostęp igły biopsyjnej.
Technicznych	<ul style="list-style-type: none"> • Ograniczony wybór napędów: pneumatyczne, hydrauliczne, piezoelektryczne oraz ultradźwiękowe; • Współpraca z dedykowanym układem sterowania, przystosowanym do pracy silników w skanerze rezonansu magnetycznego; • Dedykowane enkodery oraz pozostałe czujniki, wolne od emisji zakłóceń wobec rezonansu magnetycznego.
Materiałowych	<ul style="list-style-type: none"> • Konieczność zastosowania materiałów podległych sterylizacji dla elementów wymiennych robota; • Bezwzględny zakaz wykorzystania materiałów ferromagnetycznych.
Konstruktoryjnych	<ul style="list-style-type: none"> • Liczba stopni swobody pokrywająca założenia dotyczące przeznaczenia manipulatora; • Forma konstrukcji umożliwiająca zastosowanie folii do przykrycia robota w czasie zabiegu.



Rysunek 1. Widok izometryczny konstrukcji manipulatora (źródło: opracowanie własne)



Rysunek 2. Schemat kinematyczny manipulatora do procedury biopsji stercza, wraz z liczbą członów oraz klasami par kinematycznych (źródło: opracowanie własne)



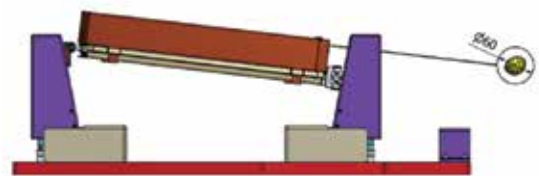
Rysunek 3. Widok izometryczny konstrukcji manipulatora bez osłon, z opisem głównych elementów konstrukcji (źródło: opracowanie własne)

Robot posiada równoległą strukturę kinematyczną (Rys. 1-3.). Konstrukcja taka posiada większą sztywność, przez co lepiej przenosi obciążenia, oraz dokładność, od tradycyjnych robotów o strukturze szeregowej.

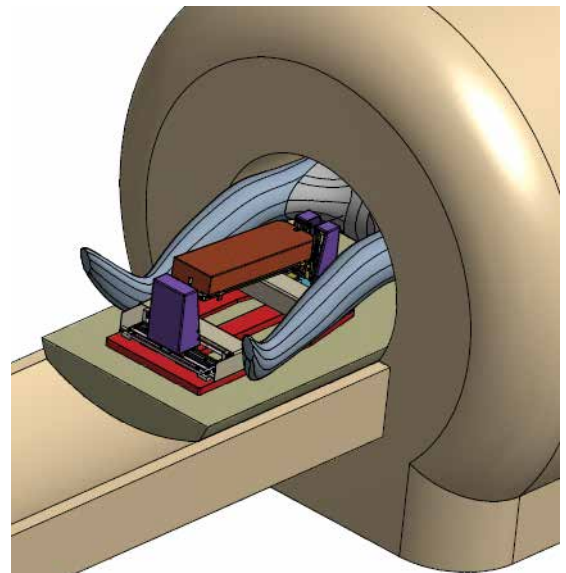
W strukturze manipulatora wyróżnić można kilka podstawowych członów. Podstawę, która mocowana jest do stołu rezonansu magnetycznego. Dwie ramy ruchome, poruszające się poprzecznie. Dwa wózki ruchome, umieszczone wspomnianych ramach, poruszające się w płaszczyźnie pionowej. Platformę ruchomą, połączoną w przedniej części z jednym z wózków przy wykorzystaniu przegubu Cardana. W tylnej części zaś, platforma jest połączona z drugim wózkiem przy wykorzystaniu przegubu kulistego o czterech stopniach swobody. Na platformie ruchomej umieszczony jest efektor manipulatora, a więc igła biopsyjna, w postaci odrębnych stopni swobody jako zgłębnik oraz kaniula.

Większość elementów została tak zaprojektowana aby proces technologiczny zakładał obróbkę skrawaniem. Wybór ten spowodował konieczność wyboru materiałów wykorzystanych do budowy na odpowiednie do skrawania, a jednocześnie nie wpływające negatywnie na wytrzymałość konstrukcji. Ostatecznie projekt zakłada wykorzystanie wyłącznie jednego stopu aluminium, EN AW 6082 w stanie T6/T651/T6, który dobrze nadaje się do gięcia, spawania oraz obróbki skrawaniem. Zastosowanie tworzyw sztucznych realizuje się poprzez elementy z polisiarczku fenylenu, wobec tych mniej obciążonych oraz polisiarczku fenylenu zmodyfikowanym włóknem szklanym, wobec tych bardziej obciążonych. W konstrukcji igły biopsyjnej występuje dodatkowo polipropylen oraz ceramika, natomiast osłony zostaną wykonane w technologii druku 3D jako element z tworzywa ABS. Elementy złączne poszczególnych części robota wykonane są austenitycznej stali nierdzewnej.

Każdy z członów robota napędzany jest przy wykorzystaniu przekładni pasowej zębatej oraz przekładni



Rysunek 4. Przestrzeń robocza manipulatora medycznego wokół gruczołu krokowego – widok boczny (źródło: opracowanie własne)



Rysunek 5. Umieszczenie manipulatora medycznego na stole rezonansu magnetycznego (źródło: opracowanie własne)

śruba – nakrętka. Współpraca polimerowej nakrętki oraz aluminiowego wału śrubowego charakteryzuje się minimalizacją luzów. Do łożyskowania wałów wykorzystano polimerowe łożyska ślizgowe.

Ruch przedstawionego robota jest uzyskiwany przy wykorzystaniu wyłącznie jednego typu silnika. Jest to niemagnetyczny, ultradźwiękowy napęd, wykorzystujący w swoim działaniu efekt piezoelektryczny. Silnik ten posiada maksymalny moment obrotowy oraz trzymający na poziomie 0,1 Nm oraz prędkość maksymalną 250 obrotów na minutę. W projekcie zastosowanie znalazły czujniki odkształcenia oraz inkrementalne enkodery liniowe. Zastosowanie wspomnianych czujników jest podstawą do pozycyjno – siłowego układu sterowania.

Główna przestrzeń robocza manipulatora przedstawia całą przestrzeń roboczą jaką może osiągnąć igła biopsyjna. Środowisko pracy nie wymaga jednak aż takiej przestrzeni. W rzeczywistości igła biopsyjna porusza się wyłącznie w wąskim korytarzu do elementu docelowego jakim jest prostata. W rezultacie końcówka zgłębnika jak i kaniuli pobiera tkankę z przestrzeni kulistej o średnicy 60 mm (Rys. 4.). Oczywistym jest również, że umiejscowienie tej

przeźreni jest dla każdego badania inna ze względu na różnice w budowie ciała poszczególnych pacjentów.

Podczas pracy, manipulator medyczny przymocowany będzie do stołu rezonansu magnetycznego (Rys. 5.). Robot w czasie zabiegu będzie wyłącznie w części umieszczony w skanerze rezonansu, ze względu na swój gabaryt, swobodę manipulacji oraz dostęp do pacjenta.

Równoległa struktura kinematyczna manipulatora oraz pięć stopni swobody, którymi dysponuje, obliuguje umiejscowienie na skraju głównego otworu rezonansu magnetycznego, w środku zaś znajduje się wyłącznie ramka odniesienia, dzięki czemu istnieje możliwość transformacji pomiędzy układami odniesienia robota, a układem odniesienia gruczołu krokowego. Wszystkie te czynniki wiążą się również z koniecznością ułożenia pacjenta w pozycji litotomijnej.

STRATEGIA STEROWANIA ORAZ TELEMANIPULACJI

Podstawowym aspektem poprawności założeń wobec układu sterowania jest brak oddziaływania wobec pracy rezonansu magnetycznego, a szczególnie wobec obrazowania tkanek miękkich. Konieczne jest zatem zastosowanie odpowiedniego filtrowania emisyjności układów elektrycznych. Oczywistym jest również, że działanie rezonansu magnetycznego nie może wpływać negatywnie na układ sterowania. Oba systemy więc muszą obopólnie być wobec siebie bezpieczne.

Jednym z najważniejszych elementów systemu sterowania robota jest jego zewnętrzne połączenie. Bieżący projekt zakłada współpracę z rezonansem magnetycznym, co za tym idzie układ kontrolujący ruch robota w polu magnetycznym musi pozostawać w obustronnej komunikacji z oprogramowaniem zarządzającym pracą MR. Obrazowanie elementów wykonywane jest przy wykorzystaniu medycznego oprogramowania 3D Slicer, który umożliwia wizualizację wybranych tkanek pacjenta w pełnym, objętościowym widoku 3D, a także w widoku 2D w trzech krzyżujących się płaszczyznach [15][8].

Istotnym aspektem układu sterującego robota medycznego jest również jego struktura. Panel kontroli użytkownika winien się znajdować przy oprogramowaniu, które umożliwia podgląd obrazowania w czasie rzeczywistym, a więc 3D Slicer. Chirurg, w czasie przeprowadzania zabiegu musi jednocześnie opierać się na danych z obrazu tkanek miękkich. Za przeprowadzanie obliczeń co do aktualnej pozycji robota mogłaby odpowiadać jednostka centralna, bezpośrednio wymieniająca informacje z jednostką obrazującą. Aby manipulacja występowała w systemie master–slave, który jest koniecznością

w przypadku ingerowania w ciało pacjenta, należy zastosować pasywny manipulator. Sam układ sterowania powinien jednak automatycznie ustawiać efektor robota, a więc igłę biopsyjną na kierunku do prostaty. Wówczas zadaniem chirurga byłby jedynie wybór, od której strony ma zostać wykonany zabieg. Taka struktura układu sterowania wiązałaby się z zastosowaniem specjalnej kamery, kompatybilnej wobec rezonansu magnetycznego. Aby jednoznacznie wspomóc lekarza chirurga i zapewnić komfortowe warunki odczytu miejsca wkłucia igły biopsyjnej, należałoby umieścić wiązkę światła, na szczycie osłony platformy ruchomej. Przy takiej wizualizacji, operator prowadzący zabieg miałby pewność co do poprawności ustawienia manipulatora medycznego.

PODSUMOWANIE

Zaawansowany rozwój nowych technologii w zakresie elektroniki, produkcji materiałów oraz sposobów ich obróbki, a także powszechna miniaturyzacja, dają podstawy do rozważań nad łączeniem rozwiązań, na co dzień wykluczających obopólną współpracę. Obecnie, zauważyć można coraz odważniejsze wprowadzanie manipulatorów do świata medycyny. Oczywistym jest, że tego typu rozwiązania mają szereg wad oraz zalet, każdy przypadek musi być więc rozpatrywany osobno. Istnieją natomiast obszary, w których roboty mają znikome zastosowanie kliniczne. Jednym z nich jest współpraca z rezonansem magnetycznym, przy wykorzystaniu którego uzyskuje się wysokiej jakości zdjęcia, obrazujące zmienione chorobowo tkanki miękkie. Tę właściwość uzyskuje się również w przypadku obrazowania gruczołu krokowego, celem wykrycia zmian nowotworowych.

Przedstawione studium projektowe wykazuje możliwość wykonania manipulatora medycznego na potrzeby prowadzenia procedury biopsji stercza, współpracującego z rezonansem magnetycznym. Specyficzne warunki pracy determinują w wielu aspektach nietypowe rozwiązania konstrukcyjne. Robot odznacza się spełnianiem wszystkich początkowych ograniczeń konstrukcyjnych, materiałowych, technicznych oraz funkcjonalnych. Trudności w pracy nad projektem przejawiały się przede wszystkim w nieznaności podstaw medycznych oraz nowatorskim charakterem zagadnienia.

Oczywistym jest, że sam projekt proponowanego rozwiązania to tylko część tego co należy zrobić aby robot medyczny zaczął pracę oraz stałoby się możliwe, przy jego wykorzystaniu przeprowadzić zabieg. Kolejnym etapem prac powinno być przygotowanie pełnej struktury układu sterowania, panelu kontroli oraz formy wymiany informacji pomiędzy elementami układu. Następnie należy sprawdzić jak fizycznie prezentuje się manipulator oraz elementy i układy, bezpośrednio z nim związane. Jeżeli do tego mo-

Roboty w służbie medycyny



RobinHeart

polski produkt, współpraca
FRK - Meden-Inmed

Vertimo Hi-Lo Step

polski produkt, współpraca
PIAP - Meden-Inmed



Więcej informacji na:

www.meden.com.pl



REKLAMA

mentu, wszystko przebiega prawidłowo, pozostaje ostatni, najtrudniejszy etap. Etap badań, weryfikujących przydatność oraz możliwość wykorzystania w bezpośrednim kontakcie z człowiekiem.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Biopsje [online]. Dostępny w Internecie: <http://www.biopsje.pl>
- [2] ALL ABOUT BIOPSIES [online]. American Board of Pathology. Uthman E. O. Dostępny w Internecie: http://training.seer.cancer.gov/treatment/surgery/all_about_biopsy_accessible.pdf
- [3] Bickels J. [i in.]: Biopsy of Musculoskeletal Tumors. W: Musculoskeletal Cancer Surgery. Dordrecht, Springer 2001.
- [4] About prostate cancer [online]. Dostępny w Internecie: <http://www.cancerresearchuk.org/about-cancer/prostate-cancer/about>
- [5] Finding Prostate Cancer Early [online]. Dostępny w Internecie: <https://www.cancer.org/cancer/prostate-cancer/early-detection/finding-prostate-cancer-early.html>
- [6] Yakar D., Futterer J.: MR-Guided Prostate Biopsy. W: Interventional Magnetic Resonance Imaging. Berlin, Springer 2012.
- [7] Umbreit E., Shimko M., Gettman M.: Prostate Anatomy and Prostate Cancer Screening, Diagnosis, Staging, and Prevention. W: Ponsky L. E. [i in.]: Treating Prostate Cancer and Related Genitourinary Applications. Berlin, Springer 2012.
- [8] Su H.: Force Sensing and Teleoperation of Continuum Robot for MRI-Guided Surgery. Worcester, Worcester Polytechnic Institute 2013.
- [9] Cosciani Cunico S. [i in.]: Prostate Biopsy. W: Olivetti L., Grazzoli L.: Imaging of Urogenital Diseases. Mediolan, Springer 2009.
- [10] Shinohara K.: Prostate Biopsy Techniques. W: Prostate Biopsy. Indications, Techniques and Complications. New Jersey, Humana Press Inc. 2008.
- [11] The Role of Combined MRI & MRSI in Targeting Prostate Cancer [online]. Dostępny w Internecie: <http://www.mrisusa.com/pdf/S-TheRoleofCombinedMRI.pdf>
- [12] Zhou H. [i in.]: The Drive and Control System Design for MRI Guided Robot. W: Recent Advances in Computer Science and Information Engineering. Berlin, Springer 2012.
- [13] Singh H., Neutze J. A.: MRI. W: Radiology Fundamentals. Nowy Jork, Springer 2012.
- [14] Su H., Cole G. A., Fisher S.: High - Field MRI - Compatible Needle Placement Robots for Prostate Interventions: Pneumatic and Piezoelectric Approaches. W: Advances in Robotics and Virtual Reality. Berlin, 2012.
- [15] Tauscher S. [i in.]: OpenGLLink interface for state control and visualisation of a robot for image-guided therapy systems. International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery. Marzec 2015, Vol. 10, Issue 3.
- [16] Hashim H., Abrams P.: Transrectal Ultrasound Scan and Biopsy of the Prostate. W: The Handbook of Office Urological Procedures. Londyn, Springer 2008.
- [17] Podśędkowski L.: Roboty Medyczne. Warszawa, WNT 2010.
- [18] Mianowski K., Nawrat Z.: Perspectives of Medical Robotics Evolution In Poland In the beginning of Twenty First Century, Proc. IEEE Conf. MMAR'02, Szczecin 2002,
- [19] Mianowski K.: Dextrous Fully Parallel Manipulator with Six Degrees of Freedom, Proc. Ro.Man.Sy'98, Springer-Verlag 1998, rozdz. pracy „Konstrukcja, sterowanie i programowanie złożonych systemów robotycznych”, WPW, Warszawa 1997,
- [20] Mianowski K.: Manipulator POLMAN 3x2 do zastosowań neurochirurgicznych, Kraj. Konf. AUTOMATION 2003,
- [21] Nawrat Z., Podśędkowski L., Mianowski K., Religa Z.: Robin Heart in 2002 - actual state of Polish cardio-robot, Proc. III Int. Workshop RoMoCo'02, Bukowy Dworek 2002,
- [22] Mianowski K.: On some aspects of kinematic properties of parallel manipulators destined for some new applications, Proc. RoMoCo'2002, Bukowy Dworek 2002,
- [23] Podśędkowski L., Mianowski K., Wróblewski P., Nawrat Z.: Kinematic Aspects of Selected Manipulators for Cardiac Surgery, Proc. IEEE Conf. MMAR'02, Szczecin 2002,