

Integracja konsoli Robin Stiff Flop z robotem chirurgicznym Robin Heart Tele

Artykuł recenzowany

PRACA ZGŁOSZONA DO KONKURSU
Nagroda Statuetka Robina

Streszczenie

System Robin Heart Tele z rozwiniętą koncepcją platformy narzędziowej jest prototypowym robotem chirurgicznym pracującym w strukturze master-slave. Przedstawiono w pracy autorski system sterowania robota z konsoli Robin Stiff Flop. Całość systemu sterowania robotem w czasie rzeczywistym wykonano w środowisku MATLAB. Weryfikację poprawności działania algorytmu sterującego przeprowadzono wykorzystując model fizyczny oraz model w technologii przestrzeni wirtualnej. Następnie wykonano implementację algorytmu na mikrokontroler z rodziny STM32F4. Działanie systemu sterowania jest badane, modyfikowane i optymalizowane podczas testów robota. Planowany jest rozwój projektu przez dodanie kolejnych stopni swobody i sensorów dla narzędzi układu ze sprzężeniem siłowym.

Abstract

The Robin Heart Tele system, with its advanced platform concept, is a prototype of a surgical robot working in a master-slave structure. Robin Stiff Flop's robotic control system has been featured in the paper. The entire real-time robotic control system was performed in a MATLAB environment. The validation of the control algorithm was performed using a physical model and a virtual space technology model. Then the execution of the algorithm was implemented on the STM32F4 microcontroller. The operation of the control system is tested, modified and optimized during robot testing. It is planned to develop the project by adding more degrees of freedom and sensing for the tools with force feedback.

**DARIUSZ KRAWCZYK,
PIOTR KROCZEK**

Fundacja Rozwoju Kardiologii,
Foundation of Cardiac Surgery
Development,
Pracownia Biocybernetyki, Zabrze

Słowa kluczowe:

system sterowania
telemanipulatorem,
roboty chirurgiczne,
chirurgia robotowa

Key words:

telemanipulator control system,
surgical robots, robotic surgery

■ WSTĘP

Genezą projektu robota Robin Heart była potrzeba wprowadzenia w pełni funkcjonalnego narzędzia do małoinwazyjnych operacji na sercu. Rodzina robotów (manipulatorów) Robin Heart powstawała w Fundacji Rozwoju Kardiologii im. Prof. Zbigniewa Religi w Zabrzu we współpracy ze specjalistami z kilku ośrodków akademickich i przedsiębiorstw. Robot kardiologiczny jest manipulatorem kopiującym, telemanipulatorem, który składa się z dwóch lub więcej ramion narzędziowych i jednego podtrzymującego kamerę oraz układu zadawania ruchu pracujących pod nadzorem układu sterowania. Operator wykonuje różne zadania, sterując ruchem końcówki roboczej narzędzia przymocowanego do ramienia [1].

Robot Robin Heart Tele był wykonany w Fundacji Rozwoju Kardiologii im. prof. Zbigniewa Religi w ramach projektu „TeleRobinSurgery – opracowanie i badania nowych rozwiązań technicznych dla zdalnie sterowanych operacji chirurgicznych za pomocą robotów Robin Heart”. PBS1/A3/2/2012 kierowanego przez dr inż. Pawła Kostkę. Projekt, wykonanie, wdrożenie robota było realizowane przez zespół Robin HeartTeam Pracowni Biocybernetyki FRK kierowany przez Zbigniewa Nawrata. Za część mechaniczną odpowiadali Krzysztof Lis, Krzysztof Lechrich, Łukasz Mucha [2]. Konsola i zadajniki ruchu były wykonane i rozwijane w ramach zadań wykonywanych przez zespół Robin HeartTeam Pracowni Biocybernetyki IPS FRK kierowany przez Zbigniewa Nawrata projektów EU Stiff Flop koordynowanym przez Kings College w Londynie i ENIAC „INCITE” koordynowany przez Philips w Eindhoven.

■ ROBIN HEART TELE

System Robin Heart Tele (Rys. 1) jest prototypowym robotem chirurgicznym pracującym w strukturze master-slave, w którym zastosowano platformę narzędziową opartą na koncepcji poprzedniego modelu Robin Heart mc². Składa się z modułu konsoli sterowania oraz modułu manipulatora. Jest to robot zaprojektowany do operacji na odległość tzn. połączenie konsola-robot może być zrealizowane za pomocą protokołu internetowego.



Rysunek 1. System Robin Heart Tele

Manipulator (Rys. 2) składa się z ramienia głównego o dwóch stopniach swobody oraz platformy narzędziowej zawierającej dwa miniroboty i kamerę endoskopową. Elementem końcowym każdego minirobota jest uniwersalne narzędzie laparoskopowe, pozycjonowane przy pomocy pięciu aktywnych i dwóch pasywnych stopni swobody. Pomiędzy minirobotami znajduje się ramię trzymające kamerę endoskopową umożliwiając jej dodatkowy ruch wraz z obrotem wzdłuż osi „z”. Główne ramię robota pozycjonuje zgrubnie narzędzia, natomiast za precyzyjne ruchy odpowiadają miniroboty.



Rysunek 2. Model telemanipulatora Robin Heart Tele

Do sterowania robotem została zaadoptowana konsola sterowania (Rys. 3) opracowana w ramach projektu Robin-Stiff-Flop. Składa się ona z dwóch dotykowych monitorów, dwóch zadajników ruchu oraz przycisku nożnego. Jeden z monitorów przedstawia na żywo obraz z kamery umieszczonej na środkowym ramieniu robota, natomiast drugi wyświetla informacje przekazywane przez aplikację sterującą całym systemem.

Aplikacja (Rys. 4) zaprojektowana na potrzeby sterowania robotem Robin Heart Tele składa się z trzech bloków funkcyjnych:

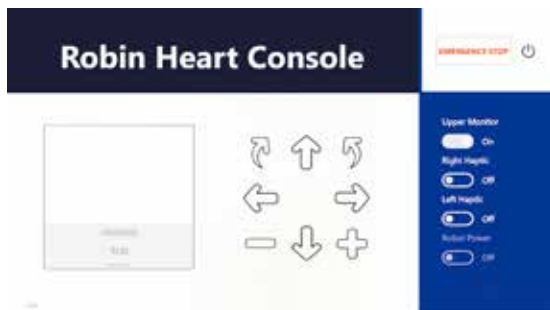
- pierwszy blok – umożliwia włączanie/wyłączanie elementów systemu: monitora wyświetlającego obraz z kamery, dwóch zadajników ruchu oraz zasilania całego robota,
- drugi blok – służy do sterowania dwoma pierwszymi stopniami swobody głównego ramienia robota oraz zmian położenia kamery endoskopowej,
- trzeci blok – odpowiada za wysyłanie poleceń sterujących: bazowanie, rozpoczęcie pracy, powrót do pozycji startowej, wyświetlanie komunikatów potwierdzających poprawne wykonanie operacji lub wystąpienie błędu.

Dodatkowo aplikacja umożliwia zatrzymanie wszystkich napędów w trybie awaryjnym, za pomocą przycisku „emergency stop”.

Układ elektroniczny konsoli posiada strukturę modułową (Rys. 5) z założeniem, że moduły są galwanicznie odizolowane od siebie ze względów bezpie-



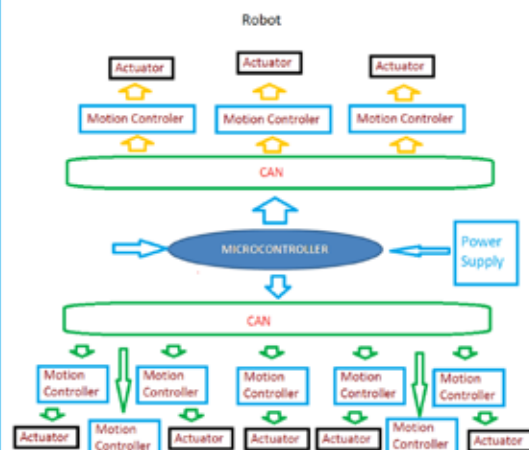
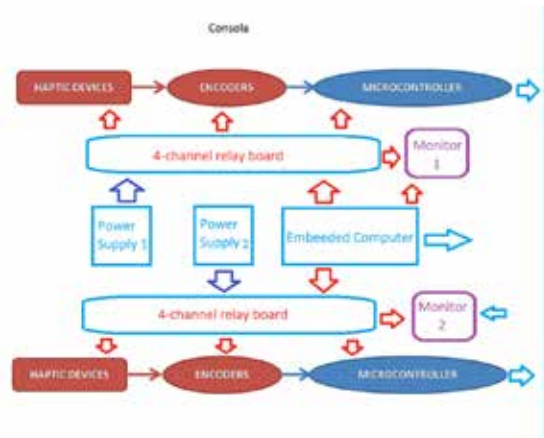
Rysunek 3. Konsola sterowania



Rysunek 4. Okno aplikacji sterującej

czeństwa. Moduł główny konsoli jest zbudowany na bazie miniaturowego komputera z systemem operacyjnym Windows IOT z aplikacją sterującą i wyświetlającą grafikę na monitorze. Pozostałe moduły to dwa siedmiostopniowe zadajniki ruchu z sprzężeniem siłowym [3, 4] (Rys. 6) oraz przekaźnikowy układ zasilania umożliwiający włączanie i wyłączanie poszczególnych zespołów (urządzeń) peryferyjnych.

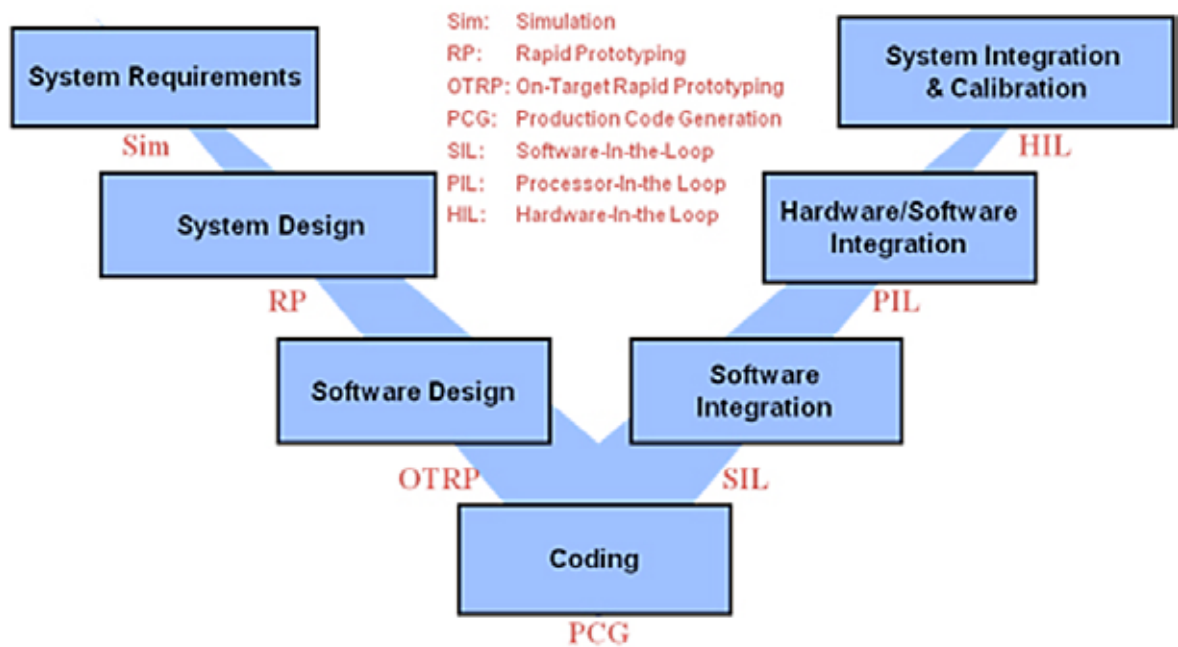
Sygnalem wyjściowym z konsoli jest informacja o pozycji i orientacji ręki operatora. Trafia ona do mikrokontrolera sterującego znajdującego się w robocie manipulatorze, który po przeliczeniu równań opisujących kinematykę manipulatora wysyła rozkazy ruchów do poszczególnych napędów z pomocą magistrali CAN. Sygnalem wejściowym konsoli sterowania jest obraz z kamery umieszczonej na środkowym ramieniu robota oraz informacja zwrotna



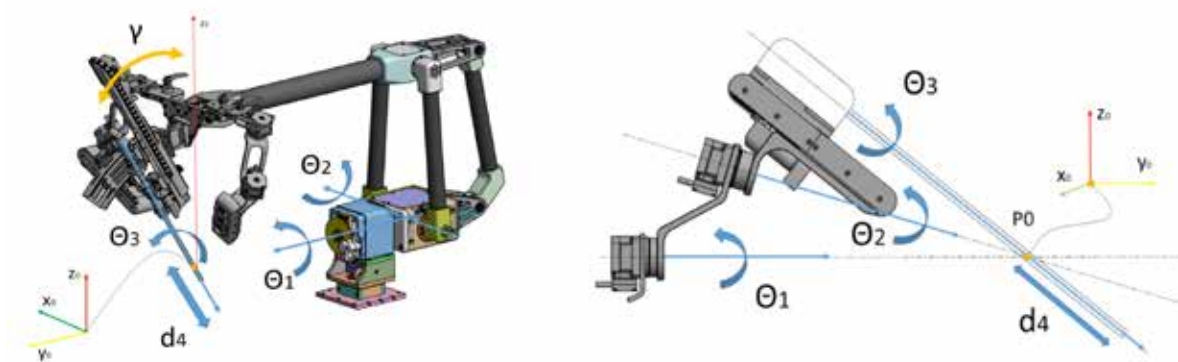
Rysunek 5. Schemat blokowy systemu Robin Heart Tele



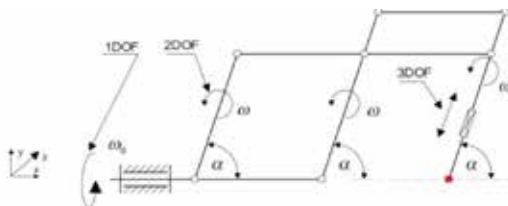
Rysunek 6. Zadajnik ruchu



Rysunek 7. Podejście Model-Based-Design [źródło http://www.autonomie.net/projects/model_based_design_10b.html]



Rysunek 8. Dwie główne struktury robota Robin Heart Tele (po lewej – ramię, po prawej – część manipulacji narzędziem)



Rysunek 9. Podwójny równoległobok – struktura robota Robin Heart (wersja Robin Heart 1)

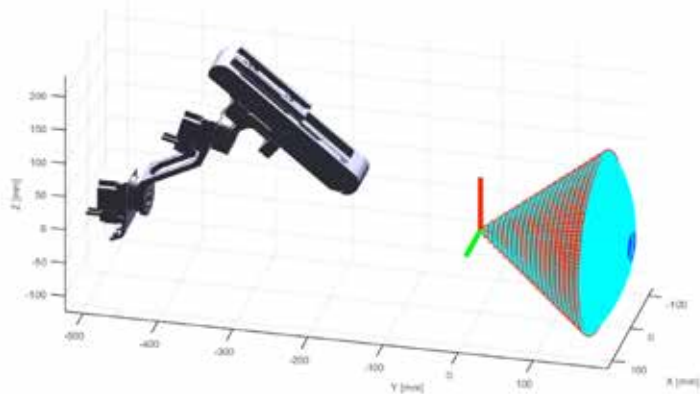
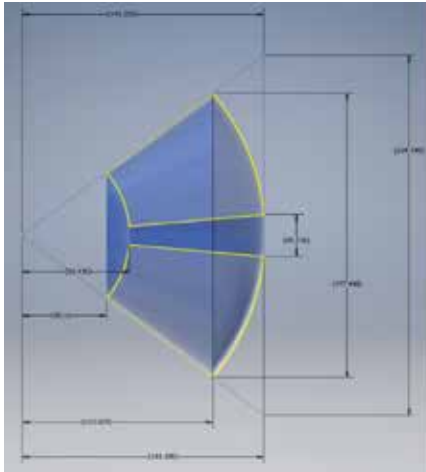
z mikrokontrolera sterującego robotem. Wprowadza dane o stanie w jakim znajduje się robot, tj. o jego poprawnym uruchomieniu, zbazowaniu lub wystąpieniu błędu/alarmu.

Sterowanie robota Robin Heart Tele było realizowane po części w oparciu o podejście Model-Base Design

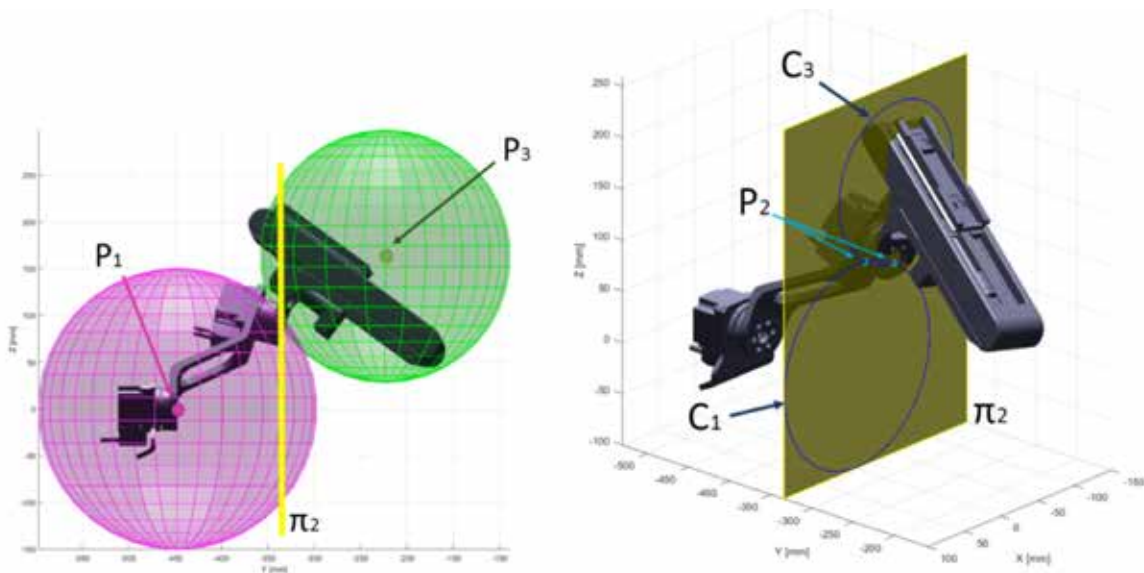
(Rys. 7). Ze względu jednak na ograniczony czas realizacji projektu pominięto ostatnie elementy związane z testami Procesor-in-the-Loop oraz Hardware-in-the-Loop na korzyść testów na rzeczywistym modelu.

Koncepcja platformy narzędziowej przewiduje zastosowanie na głównym ramieniu robota dwóch mini-robotów operujących narzędziami chirurgicznymi oraz toru wizyjnego. Z punktu widzenia sterowania w początkowej fazie obliczeń można robota Robin Heart Tele traktować jako dwie niezależne struktury: ramię główne (Rys. 8) oraz minirobot (platforma narzędziowa).

Dla głównego ramienia robota zastosowano, dobrze znaną z poprzednich konstrukcji, strukturę podwójnego równoległoboku (Rys. 9). Struktura ta jest najszerzej stosowaną strukturą wśród robotów



Rysunek 10. Porównanie przestrzeni roboczych miniroboty. Z prawej wyznaczona na podstawie równań kinematyki prostej. Z lewej wyznaczona w programie CAD.



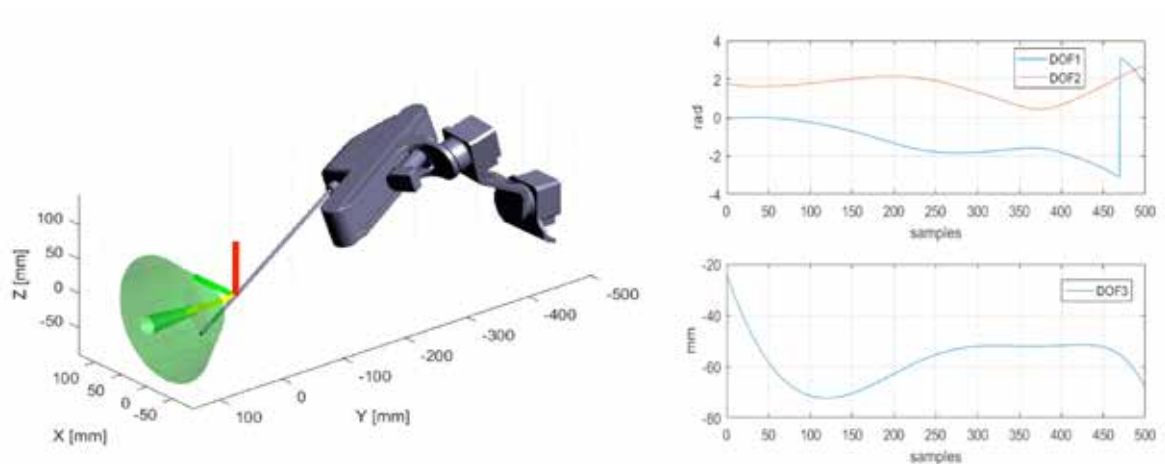
Rysunek 11. Pierwszy etap rozwiązywania zadania odwrotnego kinematyki

chirurgicznych, spełniających w sposób kinematyczny warunek stałopunktowości. W opracowanym nowym projekcie wykorzystano rozwiązania równań opisujących kinematykę robota Robin Heart Vision. Zadanie kinematyki prostej dla miniroboty rozwiązano w sposób standardowy z wykorzystaniem notacji Denavita-Hartenberga. Rozwiązanie to posłużyło do zbudowania modelu matematycznego ramienia robota oraz podstawa dla dalszych obliczeń. Dzięki rozwiązaniu zadania prostego kinematyki robota możliwe było również wyznaczenie przestrzeni roboczej ramienia i porównania jej z przestrzenią wyznaczoną w programie CAD (Rys. 10).

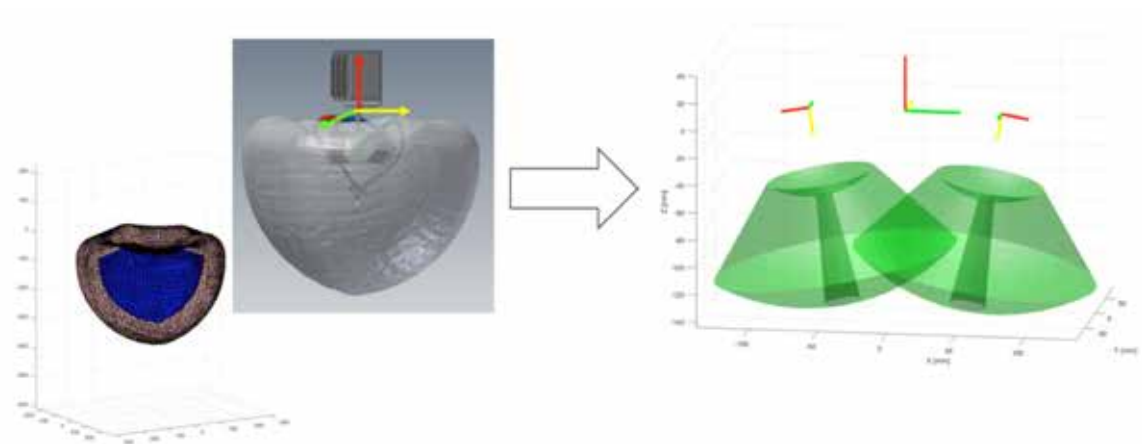
Kluczowy problem sterowania – zadanie odwrotne kinematyki robota, rozwiązano dwuetapowo. W pierwszym etapie w sposób geometryczny wyznaczono zależności dla dwóch pierwszych stopni

swobody (Rys. 11). W drugim etapie na podstawie przekształceń macierzowych oraz z wykorzystaniem poprzednich wyników wyznaczono zależności dla trzeciego i czwartego stopnia swobody. Ze względu na zastosowanie liniowego narzędzia chirurgicznego ramię miniroboty nie przyjmować dowolnej orientacji w przestrzeni. Dlatego dla pierwszych trzech stopni swobody wystarczającą informacją jest zadana pozycja we współrzędnych kartezjańskich. Natomiast czwarty stopień swobody związany z obrotem narzędzia wokół własnej osi może być sterowany w sposób niezależny. Dla większości zadanych punktów istnieją dwa równorzędne rozwiązania zadania odwrotnego kinematyki, w trakcie ruchu istotne jest zapewnienie ciągłości kolejnych rozwiązań.

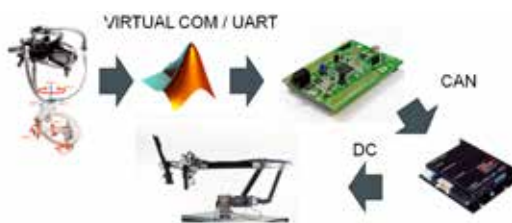
Do celów obliczeniowych wykorzystano pakiet MATLAB. W środowisku MATLAB utworzono wirtu-



Rysunek 12. Model geometryczny wykorzystywany do symulacji oraz przykładowe przebiegi zmiennych złączowych dla zadanej trajektorii



Rysunek 13. Porównanie przestrzeni roboczych manipulatora (zadajnika i narzędzia)



Rysunek 14. Schemat blokowy systemu testowego

alne modele geometryczne sprzęgnięte z modelem matematycznym, które posłużyły do weryfikacji i symulacji rozwiązań zadania odwrotnego (Rys. 12).

Kolejnym etapem było połączenie rozwiązań równań kinematyki robota – głównego ramienia robota oraz dwóch ramion narzędziowych. W środowisku wirtualnym dobrano odpowiednie ustawienie minirobotów w taki sposób aby przestrzenie robocze

posiadały część wspólną oraz znajdowały się w polu widzenia kamery endoskopowej (Rys. 13). Dodatkowo wyprowadzono zależności na kompensację położenia minirobotów tak, aby w trakcie ruchu głównego ramienia robota pozycje narzędzi chirurgicznych nie zmieniły się względem głównego, niezależnego układu współrzędnych.

Do działającego algorytmu sterowania, po przeprowadzeniu symulacji, wprowadzono funkcje komunikujące się ze sterownikami silników robota. Tak zbudowany system pozwolił na przetestowanie zadanych trajektorii na fizycznym obiekcie z poziomu środowiska obliczeniowego MATLAB oraz zweryfikowanie przyjętych rozwiązań. Z systemem sterowania należało zintegrować część nadrzędną (master) odpowiedzialną za zadawanie pozycji i orientacji. W przypadku robota Robin Heart Tele częścią nadrzędną jest specjalnie zaprojektowana konsola sterująca z unikatowymi zadajnikami ruchu (opracowanymi i wykonanymi w ramach

projektu). Na etapie integracji systemu dopasowano przestrzenie robocze zadajników do przestrzeni narzędzi chirurgicznych oraz wprowadzono dodatkowe sygnały sterujące torem wizyjnym.

Opracowany własny system sterowania pozwala na sterowanie w czasie rzeczywistym robotem z poziomu aplikacji opracowanej w środowisku obliczeniowym MATLAB (Rys. 14). Po weryfikacji poprawności działania algorytmu sterującego przeprowadzonej w rzeczywistości wirtualnej oraz weryfikacji z wykorzystaniem modelu fizycznego zaimplementowano algorytm na wybranym mikrokontrolerze. W projekcie system sterowania robotem Robin Heart Tele oparto na wydajnych mikrokontrolerach z rodziny STM32F4. Zasadniczym powodem wyboru wydajnego mikrokontrolera było duże zapotrzebowanie na moc obliczeniową wykorzystywaną do obliczeń modelu kinematycznego robota.

■ PODSUMOWANIE

Prezentowano oryginalny opracowany własny system sterowania robotem chirurgicznym Robin Heart Tele powiązany z rozwiniętą koncepcją platformy narzędziowej z konsoli Robin Stiff Flop. Całość systemu sterowania robotem w czasie rzeczywistym wykonano w środowisku obliczeniowym MATLAB. Weryfikację poprawności działania algorytmu sterującego przeprowadzono wykorzystując model fizyczny oraz model w technologii przestrzeni wirtualnej. Następnie wykonano implementację algorytmu na mikrokontroler z rodziny STM32F4. Działanie systemu sterowania było badane, modyfikowane i optymalizowane podczas testów robota. Dalsze prace związane z projektem Robin Heart Tele będą skupiały się na wprowadzeniu narzędzi z dodatkowymi stopniami swobody oraz rozbudową – uzupełnieniem ramion/narzędzi o części sensoryczne niezbędne do uzyskania w systemie siłowego sprzężenia zwrotnego telemanipulatora.

■ BIBLIOGRAFIA

- [1] Z. Nawrat, Robot chirurgiczny Robin Heart – projekty, prototypy, badania, perspektywy. Rozprawa habilitacyjna 24/2011. Śląski Uniwersytet Medyczny w Katowicach, Katowice 2011.
- [2] Patent A surgical robot's tool arms assembly EP 3146930 A1 22.09.2015 Twórcy Z Nawrat, K.Lis, K.Lehrich, Ł.Mucha, K.Rohr. Wnioskodawca: Fundacja Rozwoju Kardiologii
- [3] A manipulator of medical devices EP 2990005, US2016/0059409 Twórcy: Z Nawrat, K.Lis, K.Lehrich, Ł.Mucha.
- [4] Łukasz Mucha, Kamil Rohr, Krzysztof Lis, Krzysztof Lehigh, Paweł Kostka, Wojciech Sadowski, Dariusz Krawczyk, Piotr KroczeK, Zbigniew Małota, Zbigniew Nawrat Postępy budowy specjalnych interfejsów operatora robota chirurgicznego Robin Heart. Medical Robotics Reports 4/2015str 49- 55

■ PODZIĘKOWANIA

Projekt robota Robin Heart, w zakresie omawianym w artykule był finansowany w ramach projektu Tele-Robin – nr 181019 oraz przez Fundację Rozwoju Kardiologii i wielu sponsorów. The project supported

in part by the European Commission within the STIFF-FLOP FP7 European project FP7/ICT-2011-7-287728 i ENIAC "INCITE" project No.621278 partially financed by the Polish and Hungarian National Research.

Dziękujemy za pomoc w przygotowaniu doskonałych fotografii i Panu Mariuszowi Jakubowskiemu z Pracowni Biocybernetyki IPS FRK.

KOMENTARZ RECENZENTA...

prof. dr hab. Jacek Cieślak

Prezentowana praca zawiera szereg istotnych informacji na temat innowacyjnego rozwiązania nowej konstrukcji i systemu sterowania robota medycznego Robin Heart Tele. W pracy przedstawiono opis wytworzenia i zastosowania systemu sterowania robotem z użyciem szybkiego mikrokontrolera. Zasadniczą zaletą nowej konstrukcji jest włączenie do niej nowej konsoli i nowych zadajników ruchu (system Robin Stiff Flop) oraz przygotowanie systemu sterowania do wprowadzenia nowych narzędzi chirurgicznych wyposażonych w sensory sił – sprzężenie zwrotne pozwalające na odczuwanie oporów oddziaływania tkanek na narzędzia chirurgiczne. Praca po wprowadzeniu sugerowanych drobnych poprawek redakcyjnych, stylistycznych i uzupełnieniu bibliografii o kilka pozycji opisujących podobne rozwiązania może być skierowana do druku w czasopiśmie Medical Robotics Reports. Praca ma duże znaczenie poznawcze w zakresie rozwoju robotyki medycznej.

The work presents a number of relevant information on the innovative design of RobinHeart Tele medical robot. The paper presents a description of the creation and application of the robot control system using a fast microcontroller. The main advantage of the new design is the inclusion of a new console and new motion controls (Robin Stiff Flop) and the development of a control system for the introduction of new surgical instruments equipped with force sensing devices – feedback that allows for feeling the tissue resistance to surgical instruments. The work after introducing suggested minor editorial remarks, stylistic and bibliographic improvements as several publications describing similar solutions may be presented for publication in the journal of Medical Robotics Reports. The article is of great cognitive interest in the development of medical robotics.