

Interfejs operatora robota chirurgicznego

– oryginalne rozwiązania sprzężenia
informacyjnego i decyzyjnego

ZBIGNIEW
NAWRAT^{1,2}
PAWEŁ
KOSTKA³
KRZYSZTOF LIS³
KAMIL ROHR¹
ŁUKASZ
MUCHA³
KRZYSZTOF
LEHRICH³
WOJCIECH
SADOWSKI¹
KRZYSZTOF
KRZYSZTOFIK¹
ZBIGNIEW
MAŁOTA¹

¹Fundacja Rozwoju
Kardiochirurgii im. Prof.
Zbigniewa Religi

²Śląski Uniwersytet
Medyczny

³Politechnika Śląska

nawrat@frk.pl

Słowa kluczowe:

roboty chirurgiczne,
interfejs
człowiek-maszyna,
sprzężenie zwrotne,
systemy haptyczne,
zdalne sterowanie

Artykuł recenzowany

Streszczenie

Artykuł przedstawia postępy i perspektywy systemu sterowania (interfejsu użytkownika) polskiego robota chirurgicznego Robin Heart, w ramach projektu prowadzonego przez zespół FRK. Trwa przygotowanie pierwszego modelu klinicznego robota: nowego modelu Robin Heart PortVisionAble, lekkiego, walizkowego robota toru wizyjnego. Kolejnym wyzwaniem jest budowa konsoli sterowania ramieniem robota o kontrolowanej sztywności i geometrii.

Summary

The paper presents the achievements & perspectives, current state of works conducted by the FCSD team under the Robin Heart surgical robot console, surgeon-robot interface. The Robin Heart PortVisionAble will be prepared to track video endoscopy with new functional properties (lightweight, mobile robot) offered with telemedic system allowing the long distance image transfer. The construction of console for operator of surgical tools with controlled stiffness and geometry is another challenge for the near future.

Keywords: Surgical robots, Human-Machine Interface, Force Feedback, Haptic, Telemanipulation

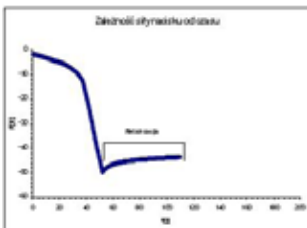
WSTĘP

Robot składa się z mechanicznego manipulatora, systemu sterowania i programowania. Według normy PN-EN ISO 8373:2001 robot jest automatycznie sterowaną, programowalną, wielozadaniową maszyną o wielu stopniach swobody, posiadającą właściwości manipulacyjne i lokomocyjne, stacjonarną lub mobilną, do różnych celów przemysłowych i specjalnych.

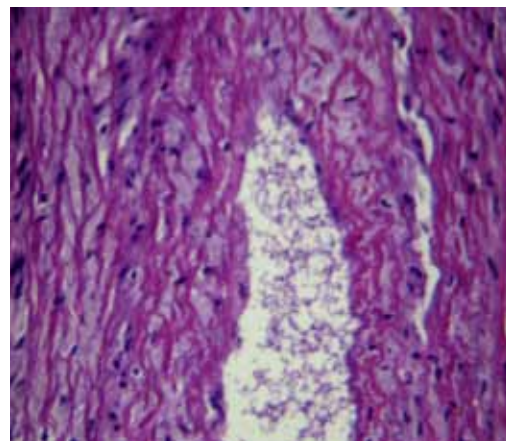
Telemanipulator to zdalnie sterowany robot. Telemanipulator chirurgiczny musi spełniać nie tylko ścisłe wymogi bezpieczeństwa i precyzji działania we wnętrzu ciała pacjenta ale też powinien wykorzystywać umiejętności chirurga zdobyte podczas wieloletniej pracy wykonywanej różnymi narzędziami. Te cele muszą być realizowane podczas projektowania konsoli i zadajników ruchu systemu sterowania robotem chirurgicznym. Dlatego we wstępnej fazie projektu robota Robin Heart badano oddziaływanie narzędzi na tkanki ale też prowadzono studia pracy za pomocą różnych narzędzi wykonawczych dla zrozumienia specyfiki doświadczenia chirurga.

Kierujący projektem Robin Heart, główny autor tego artykułu, wprowadził do prac zespołu filozofię, sprowadzającą się do algorytmu postępowania: od przedmiotu operacji do narzędzia, od analizy celu operacji do techniki operowania, od analizy cech anatomicznych, pracy i doświadczenia chirurga do stanowiska pracy chirurga [1]. Badania biomechaniczne prowadzące do założeń projektu robota zostały opisane w pracy [2].

Zespół Pracowni Biocybernetyki FRK miał pionierskie w kraju doświadczenie w zakresie modelowania komputerowego i fizycznego, symulacji efektów operacji chirurgicznych. Znajomość zagadnienia operacji chirurgicznej, celów chirurgii i sposobu ich osiągnięcia była fundamentem zało-



Rys.1 Badanie oddziaływania narzędzia podczas zaciskania naczyń (aorta indycka świeża, mikroskop 60x, oraz aorta wieprzowa, mikroskop 60x); przy nacisku do 50 N z prędkością narzędzie poruszało się z prędkością $v = 0,05$ mm/s, następnie relaksacja [3].



żeń projektowych robota Robin Heart, a następnie tworzenia systemu planowania operacji z udziałem robota. Zbudowano specjalistyczne stanowiska badawcze, opracowano metodykę badawczą i przeprowadzono badania [1].

Projektowanie robota poprzedziły studia literaturowe oraz badania własne związane z wymaganiami kinematycznymi i dynamicznymi dla typowych elementów zabiegu chirurgicznego na sercu. Wykonano badania oddziaływania narzędzi z tkanką [3] – Rys.1.

Projektowanie narzędzi stosowanych w robotach chirurgicznych rozpoczęto od zdefiniowania podstawowych czynności wykonywanych podczas chirurgicznych operacji tradycyjnych i laparoskopowych oraz szczegółowej analizy ruchów w poszczególnych zadaniach chirurgicznych. Na podstawie szczegółowej analizy czynności chirurgicznych można wyróżnić pięć funkcjonalnych zespołów ruchowych narzędzia: sięganie (ustalenie pozycji końcówki) – orientowanie; chwytanie – trzymanie/cięcie (zaciskanie chwytaka); pchanie; ciągnięcie; wypuszczanie (otwieranie chwytaka). W czasie eksperymentu polegającego na szyciu i cięciu serca świnińskiego za pomocą typowych narzędzi chirurgicznych oraz narzędzi laparoskopowych (na specjalnym modelu) określono niezbędną liczbę stopni swobody do wykonania danych czynności [1].

TELEMANIPULATOR ROBIN HEART

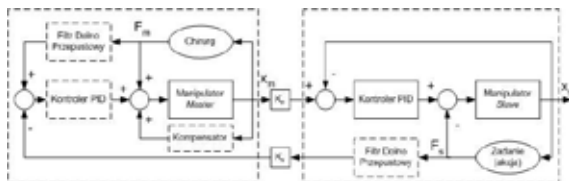
W ramach rodziny polskich robotów Robin Heart w pierwszym okresie, w latach 2000–2003, powstały trzy modele: Robin Heart 0, Robin Heart 1 i Robin Heart 2, różniące się m.in. koncepcją sterowania i mocowania. W latach 2007 – 2008 powstał służący do sterowania położeniem endoskopowego toru wizyjnego robot Robin Heart Vision. Robin Heart mc2 powstał w 2010 roku w odpowiedzi na potrzeby precyzyjnego działania w małym obszarze pola operacji. Sterowanie robotem odbywa się w ergonomicznej konsoli Robin

Heart Shell. Wprowadzono także oryginalne narzędzia mechatroniczne systemu Robin Heart Uni, które można mocować na ramieniu robota lub w specjalnym uchwycie ręcznym.

Zarówno konstrukcje (kinematyka) kolejnych modeli robota jak i rosnące doświadczenie zespołu projektowego wpływały na powstanie różnych modeli zadajników ruchu dla kontroli położenia robota i pracy narzędzi przez ostatnie 10 lat.

System sterowania robota pracuje w układzie manipulatora Master–Slave, odwzorowując ruchy operatora (chirurga) na ruch ramienia wykonawczego poprzez wypracowywanie odpowiednich sygnałów sterujących dla jego napędów. Zgodnie z założeniami sterowanie zapewnia wymaganą dokładność, pozwala na skalowanie wielkości zadanej w celu poprawienia dokładności pozycjonowania, a także eliminuje efekt drżenia rąk operatora.

Telemanipulatory chirurgiczne pracują w układzie manipulatora Master–Slave. Podstawowym zadaniem modułu sterowania, systemu pracującego w tej konfiguracji jest mapowanie ruchów operatora chirurga (zadajnika położenia/prędkości i ewentualnie innych wielkości fizycznych) na ruch ramienia wykonawczego poprzez wypracowywanie odpowiednich sygnałów sterujących dla jego napędów. Dodatkową bardzo pożądaną przez potencjalnych użytkowników systemu (chirurgów-operatorów) cechą systemu jest wbudowanie układu zwrotnego przesyłu wrażenia odczuwania siły/dotyku narzędzia do osoby operującej.



Rys.2. Dwa torzy przesyłu informacji z uwzględnieniem informacji zawartych w charakterystykach częstotliwościowych zdolności ruchowych człowieka.

Na przedstawionym schemacie (Rys.2) pokazano dwa podstawowe torzy przesyłu informacji: tor położenia zadajnika operatora oraz tor zwrotnego odczuwania siły przez operatora. Wielkości fizyczne charakteryzujące obydwie torzy przesyłu danych mogą podlegać skalowaniu.

W realizowanym aktualnie układzie sterowania systemu telemanipulatora kardiochirurgicznego Robin Heart, po analizie efektywności różnych rozwiązań, przyjęto sposób sterowania przyrostowy z możliwością odsprzęglania zadajnika od części mechanicznej całego systemu. Umożliwia to elektryczne odłączenie zadajnika w dowolnym momencie pracy, ustawienie go w nową, ergonomiczną pozycję pracy i kontynuację pracy po aktywacji sprzęgła. W celu aktywacji sprzęgła opracowano dwa rozwiązania techniczne: przycisk sterowany ręcznie umieszczony w konsoli zadajnika oraz pedał nożny [4].





Rys. 3. Studia nad zadajnikiem egzozszkieletowym (a,b), modele zadajnika wykorzystujące uchwyt narzędzia laparoskopowego (c,d,e,f,g), model zadajnika Ergomove (h), sterowanie głosem (i), konsola Robin Heart Shell 1 (j,k) oraz konsola Robin Heart Shell 2 (l).

Opracowano i przetestowano wiele konstrukcji zadajników ruchu robota zastawionych na Rys.3. Sterowanie ruchem narzędzi polega na odtworzeniu ruchu palców, dłoni czy ręki. Przeprowadzono badania modelowe i studia konstrukcyjne dotyczące sposobów przekazania intencji

Zadajniki ruchu są układami elektromechanicznymi, które mają na celu odwzorowanie ruchów wykonywanych przez chirurga w czasie operacji i przekształcenie ich na ciąg impulsów cyfrowych. Podczas operacji chirurg wykorzystuje możliwość ruchu we wszystkich stawach kończyny górnej. W określonej przestrzeni roboczej umieszczenie przedmiotu w dowolnie zadanej pozycji i nadanie mu dowolnej orientacji wymaga 6 stopni swobody. Ręka człowieka jest więc manipulatorem redundantnym. Przez ograniczenie liczby stopni swobody (ruchliwości stawów) traci się naturalną zdolność (zręczność) wykonywania różnych zadań [1].

chirurga oraz zadania ruchu poprzez odpowiednio wyposażone uchwyty i konstrukcje odwzorowujące część szkieletu dłoni czy ręki. W badaniach wykorzystywano rozwiązania technologiczne typowe dla mechaniki, hydrauliki czy pneumatyki. Roboty służące do kierowania torem wizyjnym mogą być sterowane głosem lub ruchem głowy. Wykonano odpowiednie aplikacje. W badaniach sterowania głosem opracowano komendy, które służyły do precyzyjnego poruszania robotem i ustawiania właściwej pozycji obrazu z pola operacji. Wykorzystane do tego celu komercyjne oprogramowanie zdecydowanie lepiej działało stosując formuły w języku angielskim. Wykonano próby sterowania położeniem robota za pomocą

ruchu dłoni lub głowy wyposażonej w czujniki żyroskopowe i akcelerometryczne typu MEMS. Dla sterowania telemanipulatorem toru wizyjnego uznano te technologie za wartościowe.

BADANIA SYSTEMU ZDALNEGO STEROWANIA ROBOTEM CHIRURGICZNYM

Założono, że robot chirurgiczny nie powinien ograniczać się do odtwarzania ruchu dłoni chirurga, ale aktywnie działać w polu operacji, wykorzystując wszystkie zalety urządzenia typu automat. Za pomocą jednego przycisku powinno być możliwe uruchomienie procedury w lokalnej przestrzeni operacji [1].

Układ sterowania telemanipulatora musi zapewnić wymaganą dokładność i rozdzielczość ruchu, przeskalać zakres ruchu dłoni na zakres ruchu i eliminować efekt drżenia rąk operatora. W latach 2000 – 2010 w Pracowni Biocybernetyki FRK opracowano kilka projektów urządzeń typu Master zadających ruch robota (interfejsów lekarz – robot), wykorzystujących zarówno głos lekarza (komendy wydawane głosem), jak i zadania sprecyzowane ruchem dłoni za pomocą różnego rodzaju zadajników.

Prowadzone prace badawcze możemy podzielić na badania laboratoryjne, badania na zwierzętach i teleoperacje. W pracach konstrukcyjnych możemy wyróżnić fazy:

- zadajniki ruchu – studia modelowe pierwszej fazy badawczej.
- konsola Robin Heart Shell 1 – z zadajnikiem ruchu narzędzia system RiH Uni System,
- konsola Robin Heart Shell 2 – z multifunkcyjnym zadajnikiem do kontroli,
- konsola Robin Heart Shell 3 – z obserwacją stereowizyjną i siłowym sprzężeniem ruchu.

Konsola Robin Heart Shell 1 została zweryfikowana w pierwszych eksperymentach na zwierzętach w 2009 roku, konsola Robin Heart Shell 2 podczas eksperymentu w 2010 roku. Trwają prace badawcze nad stanowiskiem pracy chirurga o rozbudowanych funkcjach obrazowania pola operacji (stereowizja) i toru sygnałów informacyjnych od pracującego narzędzia.

Metody badań przedstawimy na przykładzie badań modeli robotów Robin Heart 0 i Robin Heart 1. Główną grupą docelową są chirurdzy operujący popularnymi narzędziami laparoskopowymi z uchwytem pistoletowym i taki też był pierwszy zaproponowany

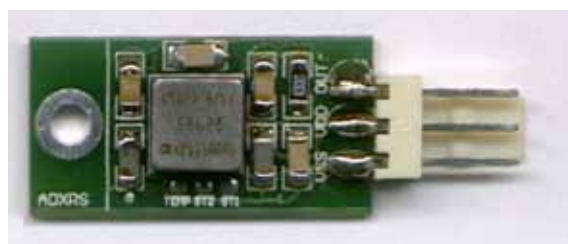
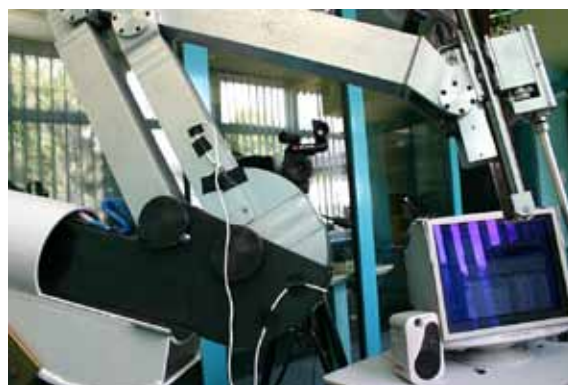
Rys.4. Robin Heart 1 stosowany był z zadajnikiem „laparoskopowym” w pierwszej wersji, następnie sterowany był z konsoli Robin Heart Shell.



zadajnik ruchu. W wyniku manipulacji kończyny górnej zadajnikiem wprowadzamy w ruch, poszczególne czujniki położenia (enkodery). Kierowanie robotem, kontrolowanie zadań wykonywanych przez narzędzia powinno odbywać się w sposób jak najbardziej naturalny, zrozumiały dla operatora, swobodny dla dłoni, nieobciążający mięśni (zmęczenie).

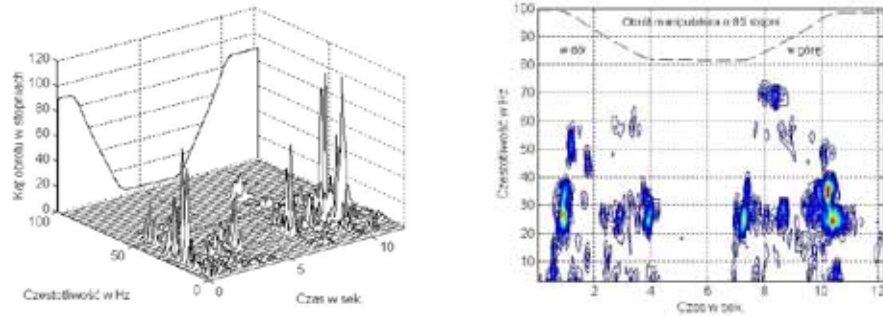
Zadajnik ruchu wykorzystujący doświadczenie chirurgii laparoskopowej (Rys. 4) pozwala na odtworzenie kinematyki robota – każdy ruch przestrzenny zadajnika ma bezpośredni odpowiednik w ruchu ramienia robota.

Ramię robota kardiochirurgicznego Robin Heart 1 ma kinematykę typu sferycznego i zadajnik położenia/prędkości stanowiący interfejs operatora, który posiada zbliżoną strukturę kinematyczną do ramienia. Rysunek 5 przedstawia umiejscowienie odpowiadających sobie czujników pomiarowych na zadajniku operatora (a) oraz ramieniu telemanipulatora (b) dla osi dwóch stopni swobody.



Rys. 5. Widok czujników MEMS na zadajniku operatora (a) i ramieniu robota Robin Heart (b) płytka elektroniczna z ADXRS150 (c).

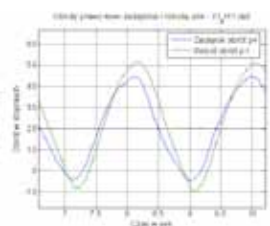
Rys. 6. Widmo drgań manipulatora w czasie obrotu manipulatora o 85° w płaszczyźnie ramienia [5].



Do prac badawczych wykorzystano monolityczny żyroskop ADXRS150, ponieważ występujące w manipulatorze prędkości kątowe nie przekraczały 150°/s. W monolitycznym żyroskopie ADXRS150 mierzone są wychylenia drgającej mikrobilki krzemowej, spowodowane działaniem sił Coriolisa podczas ruchu obrotowego, sygnałem wyjściowym jest napięcie proporcjonalne do szybkości obrotowej czujnika (ω). Rejestrowano sygnały podczas wykonywania różnych zadań kontroli wybranych trajektorii ruchu robota. Rysunek 6 ilustruje przebieg zmian widma drgań w czasie próby obrotu manipulatora w płaszczyźnie ramienia o kącie 85° (podnoszenie i opuszczanie ramienia). Można zauważyć dominujące składowe o częstotliwości zbliżonej do częstotliwości drgań własnych, jak również nasilenie się drgań przy zbliżeniu się do pozycji wyjściowej (oznaczonej jako kąt 90°).

Kolejny test polegał na pracy manipulatora w trybie śledzenia ruchów operatora przez powtarzanie ruchów zadajnika. Przedstawione na rysunku 7 przebiegi dotyczą śledzenia ruchu obrotowego całego ramienia. Odtworzono kąt obrotu, amplitudę drgań kątowych i liniowych, odniesionych do końcówki manipulatora. Na powiększonym fragmencie wykresu można zauważyć wzrost amplitudy drgań o częstotliwościach zbliżonych do częstotliwości drgań własnych, dla maksymalnych szybkości obrotowych manipulatora, i efekty pochodzące od zmiany kierunku obrotów.

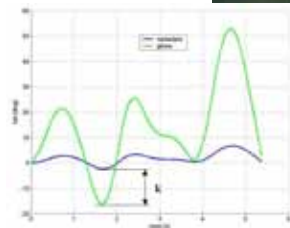
Rysunek 8 (obok) z kolei ilustruje wynik testów mapowania ruchu robota RiH 1 (kierunek główny DOF 2 – góra/dół) w postaci wyznaczonych na podstawie zarejestrowanych danych trajektorii zadajnika operatora i odpowiadającego mu stopnia swobody ramienia dla RiH 0 (a) oraz RiH 1 (b). Zmierzone opóźnienia



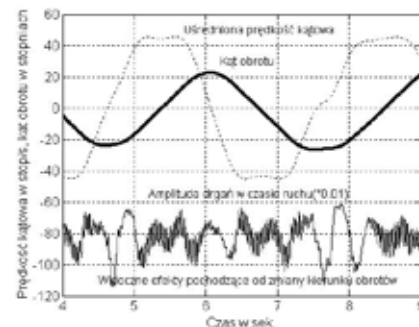
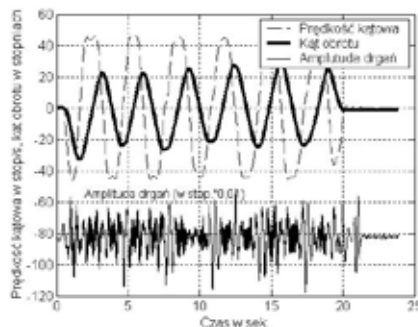
w czasie ruchu w górę to kilkanaście ms. Opracowana metodyka była wykorzystana do optymalizacji sposobu sterowania.

Prezentowane wyniki osiągnięto w 2003 r. podczas badań robotów sterowanych za pomocą komputera przemysłowego PEP i kart VIMC. Po zmianie systemu sterowania osiągnięto wyniki opóźnień poniżej 1 ms sygnału sterowania w teście teleoperacji na odległość 13 km [1].

Dla sterowania ruchem robota toru wizyjnego korzystnym jest wykorzystanie sposobów zadawania ruchu z zachowaniem dłoni chirurga na narzędziu laparoskopowym. Dlatego wykonano szereg prób wykorzystania sterowania głosem, ruchem głowy czy ruchem stopy. Wprowadzono tu metodę wideo rejestracji (Rys. 9) stosowaną poprzednio do badań kinematyki ruchu chirurga podczas wykonywania zabiegu przy pomocy narzędzi chirurgicznych.

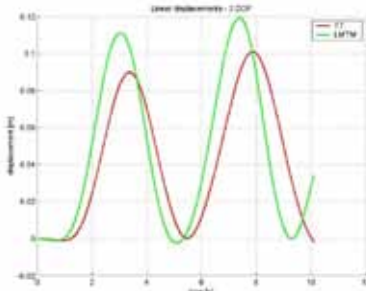


Rys. 9a. Wideorejestracja: testy różnego sposobu sterowania robotem; przemieszczenia głowy w płaszczyźnie poziomej powodujące obrót ramienia telemanipulatora RiH Vision wokół osi pierwszego stopnia swobody (k – różnica przesunięcia);



Rys. 7. Przebieg drgań końcówki manipulatora podczas śledzenia ruchów operatora [1].

Rys. 9b. Wideorejestracja: testy różnego sposobu sterowania robotem; przemieszczenie liniowe zadajnika o budowie sferycznej i końcówki torakoskopowej robota RiH 1 (T – opóźnienie ruchu) [6].



Obecnie testujemy zupełnie nowy system nadający się świetnie do sterowania położeniem robota toru wizyjnego ze względu na brak potrzeby bezpośredniego dotyku układu sterowania. W ramach opracowania i umożliwienia chirurgom testów różnych interfejsów użytkownika dla kontaktu z telemanipulatorami w Grudniu 2013 r. w PB IPS FRK Zabrze sfinalizowano I-szy etap prac programistycznych, podczas których podłączono do systemu sterowania RobinHeart bezprzewodowy detektor ruchu: LeapMotion. Ta nowa, od kilku miesięcy dostępna technologia, pozwala na bardziej precyzyjną niż inne tego typu urządzenia lokalizację obiektu (np. palców dłoni) w przestrzeni - na poziomie 0.1 mm. Może stanowić ona bardzo dobre rozwiązanie w świecie medycznym do bezdotykowego sterowania zarówno aplikacjami na monitorze komputera w warunkach szpitalnych jak i jak to pokazano na Konferencji RM'13 nawet do zadawania pozycji telemanipulatora RHVision.

Oprogramowanie zostało napisane w środowisku LabView, integrując się z pełnym systemem sterowania RH. Aktualnie trwają prace nad wykorzystaniem detektora LeapMotion nie tylko po stronie Master (Chirurg/Operator) ale również po stronie ramienia wykonawczego (Slave) do rejestracji precyzyjnej trajektorii ruchu końcówki manipulatora.

Ostateczną weryfikację wdrażanych systemów sterowania przeprowadzono podczas badań na zwierzętach w 2009 r. - testy konsoli Robin Heart Shell 1 (Rys.10) i 2010 r. - testy konsoli Robin Heart Shell 2 (Rys.11), w której wprowadzono specjalne układy umożliwiające sterowania przez chirurga wybiórczo 4 narzędzia chirurgiczne oraz toru wizyjnego. Dodatkową trudność stanowiła tu modułowość robota, którego można w różnej konfiguracji stosować

do różnych operacji. Pełny opis eksperymentów można znaleźć w [1].

NIESTANDARDOWE SPOSOBY PRZEKAZYWANIA INFORMACJI Z POLA OPERACJI

W typowym telemanipulatorze chirurgicznym, standard stanowi tu oczywiście robot da Vinci (Intuitive Surgical, USA), chirurg operuje na podstawie obrazu pola operacyjnego, w którym widoczne są poruszane narzędzia i efekt ich oddziaływania na tkanki. Narzędzia w sposób intuicyjny odtwarzają ruch dłoni chirurga.

W projekcie Robin Heart wprowadziliśmy obok intuicyjnej orientacji narzędzia w polu operacji również zadawanie sekwencji ruchów oraz wkonywanie całych zadań przez narzędzia uruchamiane za pomocą odpowiednio oprogramowanych przycisków i mikroczujników. Opracowano system ze sprzężeniem siłowym oraz dodatkowe wsparcie informacyjne z pola operacji za pomocą obrazu ultrasonograficznego.

Kolejnym wyzwaniem dla zespołu RobinHeartTeam jest budowa konsoli sterowania robotem o zmiennej, regulowanej sztywności, którego działanie i konstrukcja jest inspirowana aktywnością ruchową i budową ośmiornicy. W ramach projektu europejskiego Stiff Flop koordynowanego przez prof. Kaspara Althofera z King's College w Londynie wykonaliśmy specjalny zadajnik ruchu ze sprzężeniem dla kontroli toru poruszania robota oraz specjalne rękawy podające informacje położeniu oraz wybranych stanach czujnika siły mierzonych w różnych miejscach ramienia robota wewnątrz ciała pacjenta. Z założenia bowiem chirurg powinien nie tylko kontrolować koniec ramienia robota zaopatrzonego w narzędzie chirurgiczne ale

Rys./Fig.10. Badania/Research. Stanowiska pracy chirurga – ergonomiczna konsola Robin Heart Shell 1 z zadajnikiem w tej samej formie co uchwyt mechatronicznego narzędzia systemu Robin Heart Uni System/The surgeon's workstation – an ergonomic console Robin Heart Shell 1, with the adjuster in the same form as the holder of mechatronic tools Robin Heart Uni System.





Rys./Fig.11. Badania/Research. Stanowiska pracy chirurga – ergonomiczna konsola Robin Heart Shell 2 umożliwia jednocześnie sterowanie dwoma narzędziami i torem wizyjnym oraz dwoma narzędziami asystującymi (po zastosowaniu sprzęgła)/The surgeon's workstation – ergonomic console Robin Heart Shell 2, allows the simultaneous control of two tools, and endoscope + two assisting tools (after coupling).

również powinien znać stan, pozycję i mechaniczne oddziaływanie z otoczeniem ramienia robota na całej jego długości poruszającej się pomiędzy delikatnymi strukturami organizmu.

Aby podać lokalną informację o położeniu i wartości oddziaływania zastosowano rękawy wyposażone w sieć mini siłowników pneumatycznych lub miniaturowych sejsmicznych wzbudników drgań.

Poszukiwanie dogodnego rozwiązania konstrukcyjnego z punktu widzenia zastosowania go jako imitację kontaktu operującego manipulatorem chirurgicznym z przeszkodą zaowocowało powstaniem koncepcji zastosowania miniaturowego wzbudnika sejsmicznego, jako urządzenia mechanicznego oddziałującego na człowieka. Zaproponowane rozwiązanie przewiduje montaż na przedramieniu operatora pewnej ilości wzbudników, których celem jest dodatkowa mechaniczna informacja zwrotna o oddziaływaniach w stre-



Rys. 13. Schemat blokowy układu sterowania

fie operacji [7]. Prototyp rękawa został wykonany w dwóch wersjach (Rys.12). Obydwie wersje wykonane zostały z tkaniny elastycznej.

System sterowania oparto o mikrokontroler z rodziny dsPIC, kontrolujący pracę wszystkich wibratorów. Schemat blokowy sterownia przedstawiono na rysunku 13. Komunikacja z zewnętrznymi urządzeniami odbywa się poprzez interfejs szeregowy RS 232. Takie rozwiązanie pozwala w przyszłości na zastosowanie komunikacji bezprzewodowej, co w połączeniu z zasilaniem baterijnym pozwoli na stworzenie w pełni mobilnego rozwiązania [7].

Dla pierwszych prototypów skonstruowano płytkę PCB umieszczaną na rękawie, zasilaną z zewnętrzne-

Rys.12. Od lewej od góry: zastosowany mikrowzбудnik DC, układ sterowania, widok rękawa model 1, widok rękawa model 2.



go zasilacza dogniazdkowego i podłączoną do komputera kablem RS 232. Następnie przygotowano aplikację dla komputera PC za pomocą oprogramowania RAD Studio pozwalającą na zadawanie poszczególnych funkcji [7].

Na wybranej grupie osób zostały przeprowadzone badania subiektywnego odczucia miejsca oraz intensywności wyczuwania działania wzbudnika. Grupa ochotników została poddana testom mającym na celu określenie optymalnego – najbardziej wyczuwalnego dla użytkownika sterowania wzbudnikami. Określone zostały 3 rodzaje sterowań wzbudników. W pierwszym przypadku użyto słabych sygnałów wzbudzających w skutek czego uzyskano średnią poprawną reakcję badanych na poziomie 54%. Sporządzona została macierz odpowiedzi układu nerwowego na podawany sygnał (Rys. 14).



Rys. 14. Wyniki testów subiektywnej reakcji operatora na pierwszy sygnał sterujący [7].

W kolejnym etapie użyto sygnału prostokątnego (pulsacyjnego) o określonej częstotliwości i amplitudzie. Dla tak zastosowanego sygnału uzyskano wynik poprawności wskazania działającego wzbudnika wynoszący średnio 96%. Macierz odwiedzi przedstawia rysunku 15.



Rysunek 15. Wyniki testów subiektywnej reakcji operatora na drugi sygnał sterujący [7].

W rękawie umieszczono matrycę 16 wibratorów rozmieszczonych w czterech przekrojach poprzecznych rękawa oraz czterech przekrojach wzdłużnych imitując odczucie kontaktu ręki z otoczeniem. Z przedstawionych w artykule [7] badań wynika,

że stosowanie jako synergiczne oddziaływania wzbudników drgań o wartości przyspieszenia ok. 1 g oraz częstotliwości w zakresie 100-200 Hz może stanowić nowatorski sposób na realizację sprzężenia zwrotnego manipulator - operator, jako dodatek do stosowanego praktycznie sprzężenia optycznego. Dodatkowo możliwe jest zidentyfikowanie wystąpienia miejsca oddziaływania. Zmiany dokonane w kolejnej wersji prototypu pozwoliły na osiągnięcie wyczuwalnych trzech poziomów intensywności. Dokładność subiektywnej identyfikacji miejsca wibracji przez osoby testujące wynosiła ponad 80%, a w przypadku poziomu średniego i mocnego ponad 95%.

Wykorzystanie tego rozwiązania w konsoli sterującej robotem chirurgicznym przyczynić się może do kontrolowania ryzyka operacji robotem.

PODSUMOWANIE

Podstawowym zadaniem układu zadajnika położenia/prędkości/przyspieszenia (lub innych wielkości fizycznych) w systemie pracującego w konfiguracji Master-Slavetele manipulatora, jest mapowanie ruchów operatora chirurga przetwarzanych następnie przez układ sterujący, wypracowujący sygnały sterujące dla ramienia wykonawczego. Dodatkowo system wyposażony może zostać w moduły detekcji, przetwarzania i przekazywania operatorowi informacji zwrotnej odzwierciedlającej w różny sposób (oddziaływanie siłowe, optyczne, termiczne, wibracyjne i inne) oddziaływanie narzędzia ramienia z obiektami pola operacyjnego. Systemy wyposażone w ten tor sprzężenia zwrotnego określane są jako urządzenia typu (greckiego haptikos – uchwyt, dotyk). Zarówno sygnały niosące informację o czynnościach operatora jak i sygnały zwrotne mogą podlegać skalowaniu, co stanowi istotną zaletę układów telemanipulatorów.

Ergonomia układu zadajnika przekazującego wolę chirurga w postaci wymuszeń typu:

- przemieszczenie,
- oddziaływanie siłowe,
- polecenia głosowe,
- obsługa interfejsu programowego (np. poprzez ekran dotykowy) - o poziomie której decyduje właśnie konstrukcja i sterowanie układem „Master” oraz podstawowe zalety robotów chirurgicznych jak możliwość skalowania ruchów, eliminacji zakłóceń i drżeń mięśniowych, wysoki poziom obrazowania pola operacyjnego przy zachowaniu bardzo wysokiego poziomu bezpieczeństwa i przyjęciu rozwiązań zapewniających opłacalność ekonomiczną robotycznych operacji małoinwazyjnych (MIS) stanowią o sukcesie wdrożenia do użytku klinicznego tych rozwiązań.

Problemy komunikacji, sprzężenia informacyjnego operatora robota chirurgicznego z aktywnością w polu operacyjnym ma znaczenie podstawowe dla bezpieczeństwa i precyzji operacji. Istotnym elementem projektowanego interfejsu chirurg-maszyna, jest

wprowadzenie zwrotnego sprzężenia siłowego do zadajnika chirurga, który dla wybranych 1-2 stopni swobody przekazywałby operatorowi wrażenia/odczucia siłowe z końcówki narzędzia w ciele pacjenta - bardzo istotne z punktu widzenia przeprowadzanej operacji małoinwazyjnej przeprowadzanej przez otwory w ciele pacjenta. Problem sprzężenia siłowego zwrotnego nie został do tej pory rozwiązany adekwatnie do potrzeb chirurgii w żadnym robocie.

Praca podsumowuje doświadczenia zespołu Pracownicy Biocybernetyki FRK w zakresie interfejsu operatora robota stosowanego podczas operacji chirurgicznych. Obecnie rozwijane są prace nad wprowadzeniem sprzężenia siłowego do nowego zadajnika ruchu. Konstrukcją nowego haptica oparta jest na strukturze mechanicznej typu tripod (delta). Proponowane rozwiązanie techniczne będzie polegało na zastosowaniu jednostek napędowych na przegubach haptica do generowania kontrolowanych oporów odzwierciedlających oddziaływanie narzędzia na środowisko operacyjne wewnątrz ciała pacjenta.

Rolą współczesnych robotów, jak na razie nie jest zastąpienie chirurga lecz w sposób nadzorowany poszerzenie jego możliwości i poprawę ergonomii pracy. W tym zakresie rozwój metod sterowania i dobór sposobów przekazywania informacji oraz ich wstępne interpretowanie przez układy doradcze będzie stanowił o jakości tych telemanipulatorów życia.

ACKNOWLEDGMENTS

Robin Heart Project was supported by KBN 8 T11E 001 18 and projects: PW-004/ITE/02/2004, R1303301 and R13 0058 06/2009, and NCBR - the national Centre for Research and Development - grants: R1303301 and R13 0058 06/2009, Robin PVA - no 178576, TeleRobin - no 181019 and many sponsors. The project of flexible tool supported in part by the European Commission within the STIFF-FLOP FP7 European project FP7/ICT-2011-7-287728. Thanks to EMED company from Warsaw and Famed-Zywiec, the group of prof. Leszek Podsedkowski from Lodz University of Technology and Marek Ciembroniewicz - EMSI, Siemianowice Śląskie. Special words of

appreciation to Surgeons: dr Joanna Sliwka-Los, dr Michał Zembala (SCHS, Zabrze), dr Grzegorz Religa (Warsaw), dr Romuald Cichon (FRK, Zabrze). Current Robin Heart team: Zbigniew Nawrat, Paweł Kostka, Krzysztof Lis, Łukasz Mucha, Krzysztof Lechrich, Kamil Rohr, Zbigniew Małota, Wojciech Sadowski, Krzysztof Krzysztofik, Mariusz Jakubowski, Adam Klisowski.

PODZIĘKOWANIA

Projekt robota Robin Heart był finansowany w ramach projektu badawczego KBN 8 T11E 001 18 oraz projektu zamawianego PW-004/ITE/02/2004, grant nr R1303301 i R13 0058 06/2009 oraz przez Fundację Rozwoju Kardiochirurgii i wielu sponsorów. The project of flexible tool supported in part by the European Commission within the STIFF-FLOP FP7 European project FP7/ICT-2011-7-287728.

BIBLIOGRAFIA

1. Zbigniew Nawrat, Robot chirurgiczny Robin Heart – projekty, prototypy, badania, perspektywy. Rozprawa habilitacyjna 24/2011. Śląski Uniwersytet Medyczny w Katowicach, Katowice 2011
2. Nawrat Z.: Roboty i manipulatory w medycynie. Mechanika Techniczna. Tom 12. Biomechanika. Red. R. Będziński. Warszawa: IPPT PAN 2011, 753–827.
3. Grzybowska K.: Modelowanie fizyczne i komputerowe wybranych części robota kardiochirurgicznego. Praca magisterska. Promotor Z. Nawrat. Uniwersytet Śląski 2002.
4. Kostka P., Nawrat Z., Dybka W., Rohr K., Małota Z.: Optymalizacja interfejsu chirurg-telemanipulator. Zintegrowana konsola sterująca systemu Robin Heart. PAR 2010; 2: 546–553.
5. Nawrat Z.: Medical robots in cardiac surgery. Kardiochir. Torakochir. Pol. 2008; 5(4): 440–447.
6. Krzysztof Lis, Łukasz Mucha, Kamil Rohr, Wykorzystanie mikrowzбудników drgań do realizacji siłowego sprzężenia zwrotnego w zadajniku. Str. 175 – 188 w L. Leniowska, Z. Nawrat (red.), „Postępy robotyki medycznej” Wydawnictwo Uniwersytet Rzeszowski - Inprona, Rzeszów 2013