

Wybrane interfejsy chirurg-maszyna w strukturze systemu wizyjnego i sterowania telemanipulatorów chirurgicznych rodziny Robin Heart

Paweł Kostka*, Zbigniew Nawrat**

*Pracownia Biocybernetyki, Fundacja Rozwoju Kardiochirurgii, Zabrze

**Wydział Inżynierii Biomedycznej, Politechnika Śląska w Gliwicach

Streszczenie: Przedstawiono nowe projekty interfejsu kontaktu chirurg-telemanipulator oraz sprzętowo-programowe rozwiązania w strukturze systemu sterowania opartego o reprogramowalne układy FPGA, umożliwiające włączenie zadajników do systemu Master-Slave telemanipulatora chirurgicznego Robin Heart. Badane i przedstawione w pracy zostały zadajniki bazujące zarówno na manipulacji za pomocą kończyny górnej, jak i dolnej. W konsoli sterującej systemem, stanowiącej zintegrowany system akwizycji, przetwarzania i wizualizacji sygnałów z podstawowych kanałów komunikacyjnych systemu, przedstawiono również projekt i testy wstępne toru obrazowania przestrzennego 3D dla poprawy jakości pracy chirurga. Opisano wykorzystanie przygotowanych interfejsów i systemu sterowania w eksperymentach na zwierzętach, telemanipulacji na duże odległości oraz w przygotowaniach do pierwszego testu klinicznego dla telemanipulatora toru wizyjnego Robin Heart.

Słowa kluczowe: telemanipulator chirurgiczny, MMI, system sterowania, układy reprogramowalne FPGA, inżynieria biomedyczna

Urządzenia pierwszego kontaktu: Chirurg/Operator – Mechatroniczny System Telemanipulatora, należące do grupy MMI (ang. *Man Machine Interface*) mają podstawowe znaczenie również przy akceptacji nowych rozwiązań, a przede wszystkim tak innowacyjnych, jak roboty chirurgiczne w środowisku medycznym. Funkcjonalność i komfort pracy układu zadajnika przekazującego intuicyjnie „rozkazy” manipulacyjne chirurga do systemu – na poziomie wyższym od rozwiązań tradycyjnej laparoskopii – to warunki pozwalające uwypuklić podstawowe zalety stosowania systemów telechirurgicznych, jak:

- możliwość skalowania ruchów,
- zwiększenie precyzji,
- wygodniejsza pozycja podczas pracy, często w długim (np. kilkugodzinnym) czasie trwania operacji,
- wyższa jakość obrazowania pola operacyjnego przez wprowadzenie wysokiej rozdzielczości źródeł obrazu (kamery HD) i urządzeń wizualizacyjnych (monitory HD) z opcją 3D,
- eliminację niepożądanych efektów, np. drżenie rąk.

1. Wprowadzenie

Dla struktury Master-Slave telemanipulatora chirurgicznego Robin Heart, konsola sterująca stanowi zintegrowany system akwizycji, przetwarzania i prezentacji informacji z następujących kanałów (rys. 1):



Rys. 1. Zestawienie kanałów informacyjnych w konsoli sterującej Robin Heart Shell

Fig. 1. Steering console as a integrated centre of several important information channel transferring and processing

- tor obrazowania Slave → Master, przekazujący Operatorowi obraz z pola operacyjnego,
- tor manipulacji Master → Slave wypracowujący sygnały sterujące dla jednostek napędowych ramienia na podstawie sygnałów z zadajnika Operatora z opcjonalnym torem sprzężenia zwrotnego, przekazującego wrażenie siły kontaktu *narzędzie chirurgiczne – środowisko*,
- dwukierunkowy tor komunikacji audio-video między Operatorem a Zespołem przy stole operacyjnym,
- system zintegrowanej bazy danych, zawierający dane z diagnostyki On-line i Off-Line, z modulem doradczym implementującym algorytmy ekspertowe i wyniki symulacji procedur chirurgicznych, wspomagające podejmowanie decyzji medycznych.

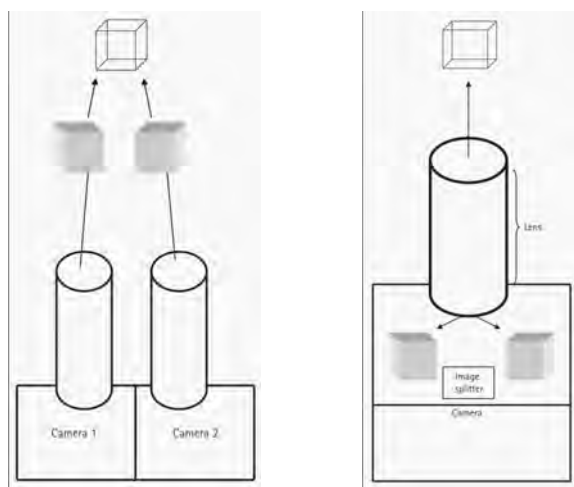
2. Tor obrazowania. Prototyp dwukanałowego system wizyjnego dla obrazowania przestrzennego: RobIN 3DView

Biorąc pod uwagę, że jak najwierniejsze, wysokiej jakości obrazowanie pola operacyjnego to jeden z najważniejszych elementów w procedurach chirurgii małoinwazyjnej MIS, w ostatnich 2 latach prowadzone były prace w naszym Instytucie nad kilkoma rozwiązaniami będącymi aktualnie w fazie testów porównawczych.

Założeniem funkcjonalnym wizyjnego kanału obrazowania stereoskopowego jest zapewnienie Operatorowi oddawanie wrażenia normalnego widzenia przestrzennego, tzn. reprezentującego nie tylko kształt i kolor obiektów, ale także ich wzajemne zależności przestrzenne, odległość od obserwatora i głębię sceny.

Wymaga dostarczenia dwóch obrazów, widzianych z perspektywy lewego i prawego oka. W tym celu wykonuje się parę dwuwymiarowych (stereoparę), reprezentujących obiekt czy scenę z dwóch punktów widzenia oddalonych, tak jak oczy obserwatora. Obrazy składowe stereopary są bardzo podobne, ale różnią się nieco kątem widzenia obiektów i szczegółami wzajemnego przesłaniania się obiektów w scenie. To właśnie te drobne różnice niosą informację o trzecim wymiarze.

Na wstępie realizacji projektu przyjęto rozwiązanie bazujące na analogicznym do naturalnego systemu wzrokowego – podwójnym torze optycznym endoskopowym (rys. 2A), zapewniającym, w odróżnieniu od symulowanego toru pojedynczego z przełączaniem półobrazów (rys. 2B), znaczącą poprawę jakości obrazu i eliminację migotania.



Rys. 2. Zestawienie schematu ogólnej struktury rejestracji sygnału wizyjnego z toru endoskopowego od strony źródła, dla toru dwukanałowego (A: po lewej) i jednokanałowego z przełączaniem półobrazów. (B: po prawej)

Fig. 2. Two structures of systems 3D endoscopic system, with double optics (A: left) and one with image switcher (B: right)

2.1. Optymalizacja bazy stereoskopowej dla specyfiki operacji endoskopowych

Za pomocą jednej z wielu technik prezentacji 3D przedstawia się lewy obraz lewemu oku, a prawy – prawemu. Przy sporządzaniu pary fotografii stereoskopowych ważny jest wybór bazy stereoskopowej, czyli rozstawu punktów widzenia. Naturalna baza – rozstaw oczu ludzkich – wynosi ok. 65 mm i tyle wynosi zazwyczaj rozstaw osi obiektywów aparatów stereoskopowych. Optymalny efekt widzenia przestrzennego uzyskuje się, gdy baza wynosi $1/100 - 1/30$ odległości do przedmiotów pierwszego planu. Przy fotografowaniu dalekich krajobrazów baza musi wynosić nawet kilka metrów, przy fotografowaniu drobnych, blisko położonych przedmiotów powinna być proporcjonalnie niewielka.

W przypadku motywów nieruchomych możliwe jest dokonywanie obu zdjęć kolejno jednym aparatem z przesunięciem

o wymiar bazy, przy czym konieczne jest zachowanie równoległości osi optycznych obiektywów, a w przypadku motywów ruchomych konieczne jest użycie dwóch aparatów z synchronizacją obu migawek lub jednego specjalnego aparatu o dwóch obiektywach. W przypadku medycznych systemów stereoskopowych, gdzie wymagane jest pozyskanie obrazu bezpośrednio z pola operacyjnego w trakcie operacji małoinwazyjnych (laparoskopowych – operacje przez małe cięcia), wymagane jest posiadanie stereoskopowej optyki endoskopowej. Specyfika takich operacji wymusza zastosowanie optyki z minimalnym rozstawem pomiędzy dwoma obiektywami (torami optycznymi), tak aby umożliwić filmowanie z zachowaniem efektu stereo obrazu z pola operacyjnego, z zachowaniem małej odległości roboczej optyki od obiektów filmowanych oraz zapewnić jak najmniejsze cięcie. Wymagania te oraz wiele innych czynników spowodowały, iż na rynku endoskopów medycznym próżno szukać producenta takiej optyki. Do niedawna jedynym producentem takiej optyki na świecie była niemiecka firma Scholly, która zaprojektowała oraz wyprodukowała taki endoskop stereo na zamówienie i na wyłączność amerykańskiego robota medycznego DaVinci firmy Intuitive Surgical (światowy lider i monopolista w produkcji robotów medycznych).

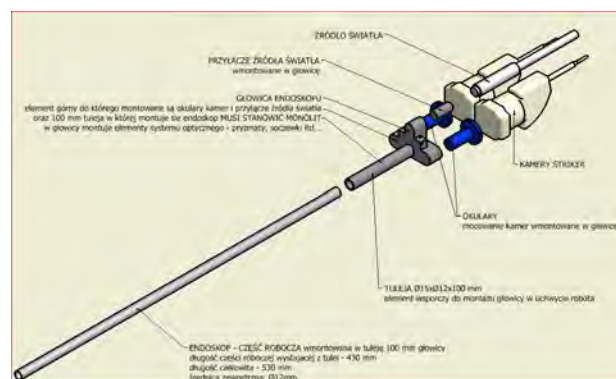
2.2. Dwukanałowy endoskop

Podstawowym i najbardziej wymagającym elementem całego toru jest jego element początkowy: endoskop stereoskopowy (dwa niezależne tory optyczne umieszczone w endoskopie o średnicy zewnętrznej do 10...12 mm). Jedyną dostępną obecnie na rynku to optyka dokumentacyjna firmy Wolf (rys. 3).



Rys. 3. Optyka dwukanałowa firmy Wolf z kątem widzenia 50°

Fig. 3. Commercial double lens from Wolf, Germany



Rys. 4. RobIN 3DView – Projekt autorskiego dwukanałowego toru endoskopowego FRK Zabrze

Fig. 4. Design of RobIN 3DView – double lens endoscopic channel from FCSD Zabrze

Jednak kąt płaszczyzny czołowej równy 50° tej optyki przeznaczonej do operacji typu TEM o długości roboczej wynoszącej około 267 mm sprawia, że trudna byłaby do adaptowania do procedur na sercu czy jamie brzusznej i wymuszałyby inne ustawienia robota względem pacjenta.

Równocześnie z opisanymi badaniami oraz eksploracją rynku torów endoskopowych prowadzimy starania nad skonstruowaniem własnego prototypu endoskopowej optyki stereoskopowej, którego projekt konstrukcji przedstawiono na rys. 4.

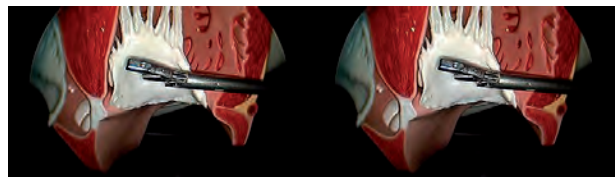
2.3. Testy i dobór parametrów dla RH-3DView

System, którego struktura pokazana jest na rys. 5, ogranicza do minimum konwersję oraz przetwarzanie sygnału wideo, co powinno mieć wpływ na końcową jakość obrazu. Wymaga jednak wykonania prototypowego dwukanałowego toru endoskopowego wg przedstawionego wcześniej projektu.

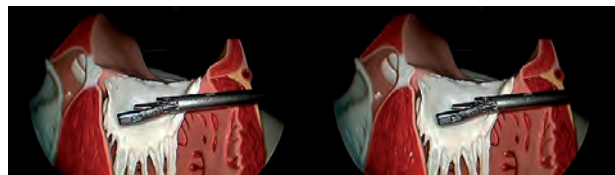


Rys. 5. Stanowisko testowe dla podwójnego toru endoskopowego
Fig. 5. Testing stand for double lens parameter optimisation

Symulując laboratoryjnie tor dwukanałowy z dwóch pojedynczych endoskopów o średnicy 4 mm, przeprowadzono testy mające na celu określenie optymalnego przesunięcia bazy. Jakościowa ocena pozwoliła dobrać go na poziomie 2...5 mm (rys. 6).



Przesunięcie bazy 2 mm



Przesunięcie bazy 5 mm

Rys. 6. Obrazy testowe z procesu optymalizacji bazy
Fig. 6. Results of optic base optimisation

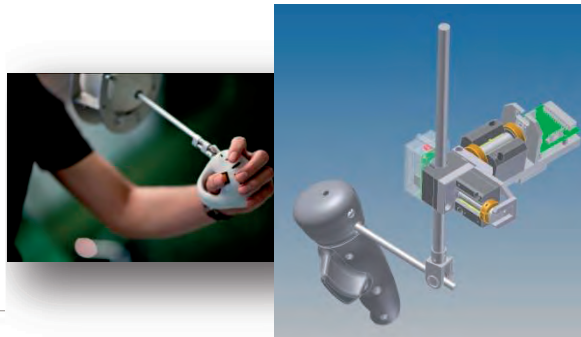
3. Nowe konstrukcje interfejsu użytkownika Master dla kończyny górnej i dolnej

W ramach badania ergonomii sposobu zadawania poleceń Chirurgu/Operatora do systemu opracowano i poddano testom dwa nowe typy zadajników Master:

- zadajnik dla kończyny górnej, z możliwością wyposażenia go w różne uchwyty manipulacyjne trzymane w dłoni

(rys. 7). Ma on 4 stopnie swobody do sterowania ramieniem $+3$ dla końcówki narzędziowej;

- zadajnik nożny z 4 stopniami swobody (dedykowany dla telemanipulatora toru wizyjnego RH Vision), umożliwiającą manipulację ramieniem robota, przy jednoczesnej manipulacji manualnej narzędziami tradycyjnej laparoskopii (rys. 7).



Rys. 7. Nowe zadajniki Master dla manipulacji ramieniem (góra) i zadajnik nożny (dół)

Fig. 7. New constructions of Master tool for arm (top) and leg (bottom) manipulation

3.1. Elastyczna struktura stopni wejściowych układu sterowania

W systemie sterowania rodziny telemanipulatorów Robin Heart zastosowano, jako moduły wejściowe akwizycji danych z czujników urządzeń zadawczych (Master), cyfrowe układy reprogramowalne FPGA, cechujące się wysokim poziomem uniwersalności i „elastyczności” dla różnych typów danych wejściowych.

Struktura pełnego systemu sterowania, oparta na sterownikach PXI i redundancyjnym sterowniku typu CompactRIO firmy National Instrument, składa się z trzech głównych części:

- Wspomniany moduł z układem reprogramowalnym FPGA, Xilinx, realizując zaprogramowane w nim algorytmy bezpośrednio na strukturach krzemowych z wykorzystaniem zalet pracy równoległej efektywnie:
 - odczytuje dane z czujników obrotowo/impulsowych (enkodery), analogowych (przetwornik A/C) oraz we/wy cyfrowych,
 - przeprowadza wejściowe procedury przetwarzania danych, jak np. skalowanie i filtracja dolnoprzepustowa.
- Układ nadrzędny z procesorem zmiennoprzecinkowych dla przeprowadzania złożonych operacji obliczeniowych (np. wyznaczanie kinematyki prostej i odwrotnej), którego zadaniem jest:

- wypracowanie sygnałów sterujących dla jednostek napędowych ramienia (w projekcie pracujących w magistrali CAN),
- wyznaczenie dodatkowych parametrów zwiększających bezpieczeństwo systemu, m.in. diagnostyka poszczególnych modułów, wyznaczenie kolizyjności.
- Układ monitorujący i umożliwiający zmianę parametrów pracy telemanipulatora, pracujący na komputerze stacjonarnym lub mobilnym, łączącym się z modułami sterowników czasu rzeczywistego łączem Ethernet.

Podziękowanie

Praca powstała w ramach realizacji projektu rozwojowego Nr N R13 0058 06/2009 „Projekt, konstrukcja, badania i optymalizacja interfejsu człowiek-robot chirurgiczny. Uniwersalna konsola sterowania telemanipulatorem Robin Heart oraz stanowiskami treningowymi chirurgii małoinwazyjnej w środowisku fizycznym i wirtualnym”.

Bibliografia

1. Nawrat Z., Kostka P.: *Polish Cardio-robot Robin Heart, System description and technical evaluation*. The International Journal of Medical Robotics And Computer Assisted Surgery. Int J. Med Robotics Comput Assist Surg 2006; 2:36-44. Published online 6 March 2006 in Wiley InterScience, DOI:10.1002/rcs.67.
2. Mohr F., Onnasch J., Falk V., Walther T., Diegeler A., Schneider F., Autschbach R.: *The evolution of minimally invasive valve surgery - 2 year experience*. Eur J Cardiothorac Surg. 1999 Mar;15(3):233-8; discussion 238-9.
3. Greer A.D., Newhook P.M., Sutherland G.R.: *Human-Machine Interface for Robotic Surgery and Stereotaxy*, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 13, No. 3, June 2008.
4. Pheng-Ann Heng, Chun-Yiu Cheng, Tien-Tsin Wong, Yangsheng Xu, Yim-Pan Chui, Kai-Ming Chan, Shiu-Kit Tso: *A Virtual-Reality Training System for Knee Arthroscopic Surgery*, IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, vol. 8, no. 2, June 2004. ■

Man-Machine interfaces in the structure of control and vision system of Robin Heart surgery telemanipulator

Abstract: New construction of Man-Machine Interfaces, 3D vision channel and control system structure of Robin Heart surgery telemanipulator are presented. Input module of control system work on the base of reprogrammable FPGA chip, which revealed to be an universal and elastic solution for different types of sensors in Master tool. New Master/Operator devices make possible to use both upper and lower limb to control the robotic arm. Prepared system was tested on several animal experiments and long distance teleoperation.

Keywords: surgery telemanipulator, Man Machine Interface, system sterowania, FPGA, biomedical engineering

dr inż. Paweł Kostka

Bioelektronik, adiunkt Wydziału Inżynierii Biomedycznej Politechniki Śląskiej, współpracujący z FRK w Zabrze w pracach badawczych, projektując systemy kontrolno-pomiarowe i przetwarzania sygnałów biomedycznych. Autor kilku wersji systemów sterowania rodziny Robin Heart dla różnych platform programowo-sprzętowych.

e-mail: pkostka@polsl.pl



dr Zbigniew Nawrat

Jeden z twórców polskiego sztucznego serca, inicjator i kierownik projektu polskiego robota chirurgicznego Robin Heart, założyciel Międzynarodowego Stowarzyszenia na rzecz Robotyki Medycznej.

e-mail: nawrat@frk.pl

