

dr Zbigniew Nawrat

Fundacja Rozwoju Kardiochirurgii, Zabrze, Śląski Uniwersytet Medyczny

dr inż. Paweł Kostka

Fundacja Rozwoju Kardiochirurgii, Zabrze, Politechnika Śląska w Gliwicach,
Instytut Elektroniki

dr Zbigniew Małota

Fundacja Rozwoju Kardiochirurgii, Zabrze

ERGONOMICZNE STANOWISKO OPERATORA ROBOTA CHIRURGICZNEGO ROBIN HEART – PRACE PROJEKTOWE, KONSTRUKCYJNE I BADAWCZE 2009–2010

Prezentowana praca przedstawia stan aktualny oraz projekt rozwoju dotyczące rozwiązania stanowiska pracy chirurga, interfejsu człowiek-maszyna opracowanego dla systemu polskiego telemanipulatora chirurgicznego Robin Heart. Konsola sterowania o nazwie Robin Heart Shell 1 oraz jej następczyni Robin Heart Shell 2 zostały poddane testom laboratoryjnym i zostały wykorzystane podczas eksperymentów robotów na zwierzętach w styczniu 2009 roku i w maju 2010 roku. W grudniu 2010 r., po zmodyfikowaniu systemu sterowania, model Robin Heart Shell 2 został wykorzystany podczas pierwszego, modelowego eksperymentu teleoperacji. Powstaje kolejny model konsoli sterowania robotem Robin Heart – wprowadzane są między innymi stereowizja i sprzężenie siłowe w wybranych stopniach swobody robota. Jednym z podstawowych elementów prac projektowych i badawczych konsoli są studia ergonomii pracy chirurga.

THE ERGONOMIC CONTROL CONSOLE OF SURGICAL ROBOT ROBIN HEART – DESIGN WORK, CONSTRUCTION AND RESEARCH 2009–2010

Current state and the assumptions of development of surgeon-machine interface for polish Robin Heart telemanipulator is presented. Control console named Robin Heart Shell 1 and its successor Robin Heart Shell 2 were subjected to laboratory testing and has been used in experiments on animals robots in January 2009 and May 2010. In December 2010, after modifying the control system, in model teleoperation experiment Robin Heart Shell 2 has been used. In formed new model of robot control console Robin Heart are introduced stereovision and force feedback in selected degrees of freedom robot. One of the basic elements of design and research studies are the console surgeon ergonomics.

1. WPROWADZENIE, STAN AKTUALNY KONSOLI STERUJĄCEJ SYSTEMU ROBIN HEART

W 2000 roku Fundacja Rozwoju Kardiochirurgii w Zabrze rozpoczęła polski projekt robota kardiochirurgicznego finansowany przez Komitet Badań Naukowych [1].

Telemanipulator służący do wykonywania operacji chirurgicznych jest urządzeniem, dla którego konsola sterowania robotem odgrywa kluczową rolę, gdyż bezpośrednio wpływa na efekt i precyzję oraz bezpieczeństwo operacji. Podstawowym zadaniem układu zadajnika położenia/ prędkości/przyśpieszenia (lub innych wielkości fizycznych) w systemie telemanipulatora jest mapowanie ruchów operatora chirurga przetwarzanych następnie przez układ sterujący, wypracowujący sygnały sterujące dla ramienia wykonawczego [2, 3, 4]. Sprecyzowano następujące wymagania podstawowe dla układu sterującego telemanipulatora [1]:

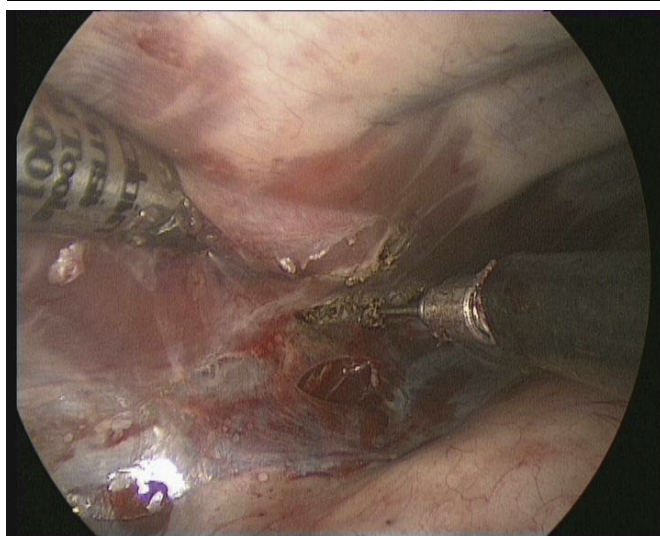
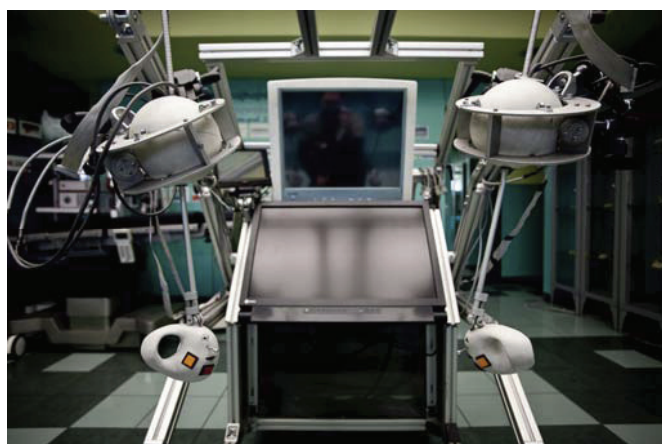
- określanie z zadaną częstotliwością próbkowania pozycji dłoni i przetwarzanie jej na ruchy narzędzia wykonawczego (NW);
- zapewnienie wymaganej dokładności i rozdzielczości;
- przeskalowywanie zakresu ruchu dłoni na zakres ruchu NW;
- eliminacja efektu drżenia rąk operatora.

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. Konsola sterowania o nazwie Robin Heart Shell 1 oraz jej następczyni Robin Heart Shell 2 (rys. 1) zostały poddane testom laboratoryjnym i zostały wykorzystane podczas eksperymentów robotów na zwierzętach w styczniu 2009 r. i maju 2010 r. W grudniu 2010 r., po zmodyfikowaniu systemu sterowania, model Robin Heart Shell 2 został wykorzystany podczas pierwszego, modelowego eksperymentu teleoperacji. Powstaje kolejny model konsoli sterowania robotem Robin Heart – wprowadzane są między innymi stereowizja i sprzężenie siłowe w wybranych stopniach swobody robota. Jednym z podstawowych elementów prac projektowych i badawczych konsoli są studia ergonomii pracy chirurga.

Cechą charakterystyczną konstrukcji jest oparcie jej na naturalnej idei operatora umieszczonego wewnątrz przestrzeni operacji, która została uzyskana przez zawieszenie przegubu obrotowego zadajników ruchu nad głową operatora oraz monitora (2D lub 3D) w części dolnej – operator patrzy swobodnie w dół pod wybranym kątem. Wygodna ażurowa konstrukcja umożliwia dopasowanie wszystkich elementów wpływających na ergonomię pracy oraz kontakt z otoczeniem (jeśli konsola znajduje się na sali operacyjnej). Układ przekazu informacji umożliwia w wygodny sposób zarówno kontakt ze światem zewnętrznym, jak i korzystanie on-line z systemu doradczego.

Badania ergonomiczne konsoli oraz wywiad z użytkownikami robota podczas testów operacji na zwierzętach wskazały na potrzebę podniesienia nieco monitora obserwacyjnego. Odtwarzając w sposób bezpośredni naturalną sylwetkę chirurga odtworzyliśmy również jego nieprawidłowe obciążenie kręgosłupa. Dzięki podniesieniu monitora chirurg oparty plecami o oparcie fotela może swobodnie obserwować ruchy narzędzi, pod kątem prostym do monitora w konsoli Robin Heart Shell 2.

Robin Heart Shell



Rys. 1. U góry; chirurg podczas operacji, który stał się inspiracją nowej konsoli oraz operator robota za pomocą konsoli Robin Heart Shell 1, poniżej konsola Robin Heart Shell 2, na dole widok sali operacyjnej ze stycznia 2009 r. i pola operacyjnego podczas eksperymentu w maju 2010 r. (Centrum Medycyny Doświadczalnej, Śląski Uniwersytet Medyczny w Katowicach)

Operator przesuwając w wygodne położenie zadajniki ruchu o kształcie przypominającym narzędzie, operuje zadajnikami bezpośrednio nad monitorem, co daje wygodną możliwość równoczesnej obserwacji ruchu dłoni z zadajnikiem oraz efektu zadanego ruchu. Pod monitorem, w dobranej przez chirurga lokalizacji, znajdują się pedały do odsprężania układu mechanicznego.

Przez otwory naturalne lub dwa, trzy nacięcia (odpowiednio oprawione – troakar) w powłokach ciała pacjenta w pole operacyjne wprowadzone są narzędzia chirurgiczne (nożyczki, kleszczyki itp.), przez kolejny – wizyjny tor endoskopowy za pomocą którego tworzony jest obraz pola operacyjnego. W konsoli zamocowane są co najmniej dwa monitory: jeden obserwacyjny nad kolanami operatora, drugi wyżej na wprost – monitor techniczny. Podczas eksperymentu w maju 2010 r. z konsoli Robin Heart Shell 2 chirurg operował robotem Robin Hart mc² w różnej konfiguracji – albo z platformą do pracy lokalnej na ramieniu środkowym albo w klasycznym już ustawieniu trzech ramion robota – dwóch narzędziowych i tor wizyjny osadzony na środkowym ramieniu.

2. BADANIA ERGONOMICZNE I WIDEO REJESTRACJA PRACY CHIRURGA

Ergonomia to dziedzina nauki i praktyki, której celem jest kształtowanie działalności człowieka odpowiednio do jego fizjologicznych i psychologicznych właściwości. Stanowisko pracy to układ, gdzie człowiek za pomocą środków pracy (maszyny, narzędzia, przyrządy), w określonej przestrzeni i środowisku wykonuje zorganizowane, celowe czynności.

Robot składa się z zespołów mechanicznych, napędów, czujników, efektorów (np. chwytak, nożyczki) i sterowania. Układ sterowania zespołów napędowych pozwala na realizację przez efektor robota określonych zadań. Zespoły napędowe manipulatora są zasilane za pomocą wzmacniaczy mocy, w sposób narzucony przez regulator. Manipulator jest wielowymiarowym obiektem regulacji. Układ sterowania (analizowane sygnały są n-wymiarowymi wektorami) tworzy zamknięty układ regulacji oceniający aktualną zgodność faktycznej realizacji zadań z planowaną.

Projektowanie miejsca pracy operatora robota chirurgicznego wymaga studiów w wielu aspektach:

- ergonomii pracy (cech szczególnych doświadczenia pracy chirurga),
- fizjologicznych i anatomicznych (np. zakres ruchu, czas reakcji),
- psychologicznych,
- zwartości systemu obejmującego strukturę kinematyczną i sterowania robotem.

Konsola jako miejsce kierowania położeniem i funkcjami wykonawczymi robota chirurgicznego jest projektem, w którym w sposób najbardziej efektywny należy wykorzystać wybrane sposoby sterowania i wiedzę dotyczącą ergonomii pracy chirurga.

Konstrukcja ludzkiej kończyny górnej pozwala nam na wykonywanie różnych czynności i ruchów, prostych i złożonych. Ludzka ręka, która ma 25 stopni swobody, ale układ sterowania telemanipulatora jest uproszczony do sześciu.

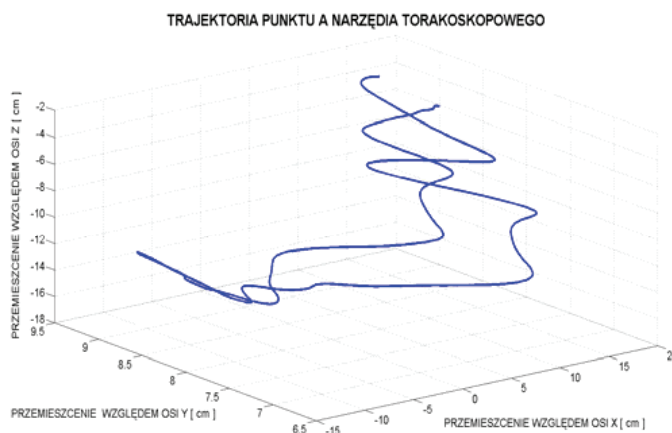
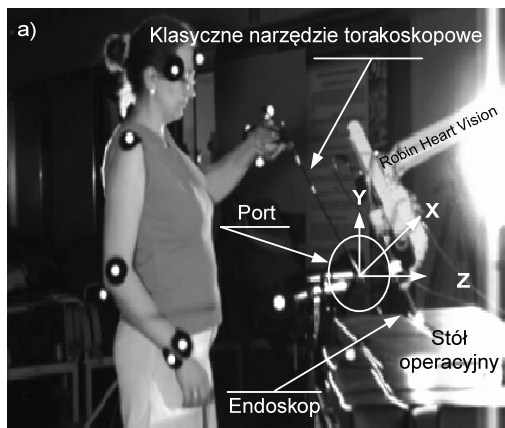
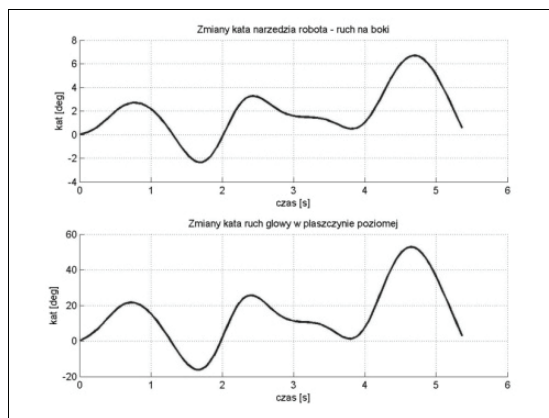
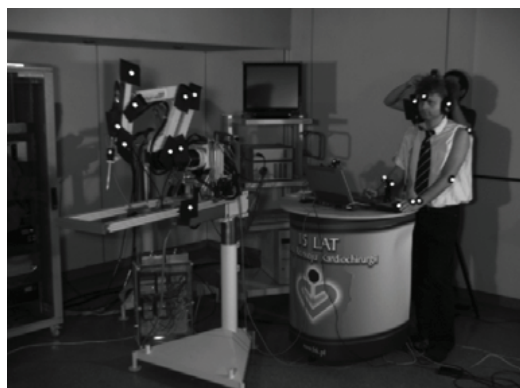
Projektowanie konsoli sterowania robotem musi uwzględniać zarówno wiedzę o klasycznej pracy chirurga jak i system badań weryfikacji proponowanych rozwiązań. Wraz z zespołem Politechniki Śląskiej pod kierunkiem G. Ilewicza wykonaliśmy w FRK wiele badań wykorzystujących technikę wideo rejestracji (rys. 2). W pracy [6] przedstawiono wyniki pomia-

rów doświadczalnych z użyciem techniki cyfrowej rejestracji optycznej ruchu łańcucha kinematycznego telemanipulatora Robin Heart Vision™ i chirurga pozycjonującego końcówkę przeznaczoną do operowania z tkankami żywymi. Przedstawiono również zastosowanie danych uzyskanych podczas pomiarów do monitorowania poprawności pozycjonowania ramienia manipulatora (część SLAVE telemanipulatora RHV) na przekazany przez zadajnik (część MASTER telemanipulatora RHV) ruch kończyny górnej lub głowy chirurga. Przeprowadzone doświadczenia umożliwiły poznanie wielkości kinematycznych dotyczących kończyny górnej chirurga sterującego zadajnikiem ruchu w celu doboru optymalnej (wygodnej) pozycji operatora w stosunku do zadajnika ruchu. Dla ruchu kończyny górnej wyznaczano zakresy przemieszczeń liniowych stawu barkowego (rys. 8) oraz zakresy przemieszczeń kątowych ramienia i przedramienia kończyny górnej w płaszczyźnie czołowej i strzałkowej [6].

Doświadczenia obserwacji pracy chirurga [7] prowadzono przy użyciu czterech sensorów optycznych (kamer cyfrowych) A602fc-2 Basler 100 [Hz] (na wyposażeniu Katedry Mechaniki Stosowanej). Kamery zostały połączone transmisją przewodową z jednostką obliczeniową, co umożliwiło zsynchronizowany zapis ruchu narzędzi torakoskopowych, kończyn górnych oraz głowy kardiochirurga. Rejestrowany sygnał (nośnik informacji) stanowiła fala świetlna odbita od refleksyjnych markerów umieszczonych na narzędziach torakoskopowych oraz istotnych anatomicznie punktach ciała kardiochirurga. Głównym celem przeprowadzonego eksperymentu było wyznaczenie wielkości kinematycznych narzędzi torakoskopowych klasycznych typu: czas [s], przemieszczenie [m], prędkość [m/s], przyspieszenie [m/s²] oraz określenie wartości zakresów ruchu narzędzi torakoskopowych stosowanych w przebiegu modelowanych procedur minimalnie inwazyjnych na sercu odzwiercym [7]. Obiektem operacji było serce wieprzowe. Otoczenie eksperymentu przygotowane przez ekspertów w dziedzinie medycyny minimalnie inwazyjnej wiernie odwzorowywało rzeczywistą sytuację operacji torakoskopowej. Obecnie tworzona jest makieta konsoli Shell do celów badawczych i treningowych.

R. Berguer w pracy [9] dokonał świetnego przeglądu stanu wiedzy w zakresie ergonomii pracy chirurga. Píše w niej, że chociaż chirurdzy bez wątpienia byli od dawna zainteresowani projektowaniem i skutecznością swoich narzędzi, Frank Gilbreth, pionier w dziedzinie Badań czasu i badania ruchu, zauważył, że w 1916 roku "... Lekarze mogą dowiedzieć się więcej o badaniach ruchu, badaniach czasu i ... naukowym zarządzaniu z przemysłu niż przemysł mógłby się uczyć od szpitali". Wśród najważniejszych elementów ergonomii pracy chirurga wymienia [9]:

- **Wizualizacja.** Głównym zadaniem wizualnej ergonomii jest adekwatna ekspozycja pola operacyjnego i jakość obrazu.
- **Manipulacja.** Jedne z ostatnich badań wykazały 20 % wzrost szybkości działania podczas operacji ginekologicznych dzięki zastosowaniu robotów. Przyszłość robotów zależy od równowagi pomiędzy wszelkimi ergonomicznymi usprawnieniami a korzyściami ekonomicznymi ich stosowania.
- **Postawa.** Wykazano, że podczas operacji laparoskopowych i ortopedycznych przez więcej niż 70 % czasu pozycja przy pracy jest zasadniczo statyczna. Badaniu układu mięśniowo-szkieletowego chirurgów wskazują na znaczną częstość występowania dolegliwości bólowych w ramionach (32 %) i szyi (39 %) (to wśród ortopedów). Pozycja siedząca jest bardziej spokojna i wygodna w dłuższym okresie np. podczas zakładania szwów, a także zapewnia bardziej stabilną postawę do kontrolowania instrumentów w czasie mikrochirurgii [9].



Rys. 2. Badania ergonomii pracy chirurga i operatora robota chirurgicznego. U góry – sterowanie ruchem głowy robotem Robin Heart Vision ((Z. Nawrat) i charakterystyki przemieszczeń kątowych ruchu głowy w płaszczyźnie poziomej [6]. Poniżej badania pracy chirurga (J. Śliwka Śląskie Centrum Chorób Serca) – trajektoria punktu A końcówki narzędzia [8]. Poniżej – kolejne badania wykonane w FRK podczas pracy chirurga operującego klasycznie oraz za pomocą telemanipulacji robotem Robin Heart z konsoli Robin Heart Shell 2

3. UKŁADY POMOCNICZE DLA PROCESU DECYZYJNEGO

Wiedza o motoryczności człowieka jest podstawowym zagadnieniem w projektowaniu interfejsu zrobotyzowanego chirurga. Rozpoczęcie ruchu jest wg Bernsteina [1947], jednego z twórców współczesnej teorii motoryczności, możliwe po wyobrażeniu celu i skonstruowaniu programu działania. Działanie ruchowe człowieka polega na nadążającym porównywaniu pożądanego wartości z aktualną, dotyczącą wskaźników charakteryzujących ruch. Dlatego wielką wagę przykładamy do procedury planowania i programu doradczego dostępnego w konsoli w trakcie operacji. Nasza baza doradcza – zmniejsza obszar niepewności, dodatkowe metody wprowadzane sensoryczne pośrednie i bezpośrednie również.

Monitor techniczny jest może być podzielony wg uznania operatora na kilka obszarów. Wśród opcji są: panel ustawiania parametrów sterowania (szybkość działania, skala ruchu, poziom odciążenia drżenia itp.), monitoring stanu pacjenta (EKG, Ciśnienie, Pulsoksymetr, Saturacja itp.), program doradczy (inteligentna baza danych obejmująca informacje diagnostyczne pacjenta, historię choroby, plan operacji, modelowanie operacji, zadaną choreografię narzędzi i dobór narzędzi w różnych fazach operacji), okno widoku panoramicznego pola operacji, okno kontaktu z tutorem, ekspertem, doradcą. Komputer może być sterowany przez monitor dotykowy lub niektóre opcje sterowane głosem.

4. WNIOSKI

Kompleksowy system interfejsu chirurga operatora obejmuje urządzenia do przeprowadzania operacji telemanipulatorem oraz ćwiczeń treningowych na modelach fizycznych i wirtualnych. System jest optymalizowany pod względem funkcjonalnym na podstawie przeprowadzonych badań i będzie zawierał elementy siłowego sprzężenia zwrotnego (dla 2 osi) oraz system doradczy z bazą danych dostępną w trybie on-line i off-line, dla chirurga operatora – zagadnienia do dzisiaj nie rozwiązane w sposób właściwy w żadnym tego typu urządzeniu. Wykonano do tej pory dwa typy konsoli: Robn Heart Shell 1 i 2. Różnią się kształtem i konstrukcją zadajnika ruchu oraz sposobem zestawienia infrastruktury sterowania i obserwacji pola operacji. Model obecnie tworzony model trzy służy do badań ergonomicznych i wprowadzenia systemu sterowania z odczuciem siły.

Badania interfejsu lekarza w aspekcie problematyki telemedycznej obejmowały:

- testy laboratoryjne,
- testy na zwierzętach,
- testy sterowania na odległość (w zakresie opóźnienia czasowego przy zapewnieniu synchronizacji wzrokowo-ruchowej chirurga operatora).

Projektowana konsola powinna posiadać wszystkie cechy użytkowe stanowiska *master* telemanipulatora chirurgicznego. Zakładamy, że jako element *slave* możemy zastosować obecnie działające roboty Robin Heart 1, Robin Heart Vision i Robin Heart mc² oraz wersja dydaktyczna – Robin Heart Junior.

Obecnie projektowana konsola posiada system obserwacji pola operacyjnego 2D i 3D oraz odpowiedni system wizualizacji pola pracy. Konsola powinna mieć możliwość współpracy z inną konsolą, np. Robin Heart Shell 2 w pracy sprzężonej dwóch operatorów w trybie nauczyciel/obserwator – chirurg operator, nadawca-odbiorca sygnałów sterowania i obrazów oraz w trybie dwóch współpracujących podczas operacji chirurgów.

Istotnym elementem projektowanego interfejsu chirurg-maszyna jest wprowadzenie zwrotnego sprzężenia siłowego do zadajnika chirurga, który dla wybranych stopni swobody przekazywałby operatorowi wrażenia/odczucia siłowe z końcówki narzędzia w ciele pacjenta. Problem sprzężenia siłowego zwrotnego nie został do tej pory rozwiązany adekwatnie do potrzeb chirurgii w żadnym robocie. Mamy nadzieje, że obecnie tworzony w Zabrze system spełni oczekiwania przyszłych użytkowników.

Podziękowania:

Praca powstała w ramach realizacji projektu rozwojowego Nr NR13 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. Z. Nawrat, W. Dybka, P. Kostka, K. Rohr. Konsola sterowana robotem chirurgicznym Robin Heart. PAR Pomiary Automatyka Robotyka 2/2008, str. 708–718.
2. A.D. Greer, P.M. Newhook, G.R. Sutherland. Human–Machine Interface for Robotic Surgery and Stereotaxy, IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS, VOL. 13, NO. 3, JUNE 2008.
3. Pheng-Ann Heng, Chun-Yiu Cheng, Tien-Tsin Wong, Yangsheng Xu, Yim-Pan Chui, Kai-Ming Chan, and 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.
4. A.E. Trejo, K.N. Done, A.A. DiMartino, D. Oleynikov, M.S. Hallbeck, Articulating vs. conventional laparoscopic grasping tools – surgeons’ opinions.
5. P. Kostka; Z. Nawrat; W. Dybka; K. Rohr; Z. Małota: „Optymalizacja interfejsu chirurg-telemanipulator. Zintegrowana konsola sterująca systemu Robin Heart”. PAR Pomiary Automatyka Robotyka 2/2010. Automation 2010. XIV Konferencja Naukowo-Techniczna. Automatyzacja – Nowości i Perspektywy. str. 546–553.
6. Grzegorz Ilewicz, Robert Michnik, Jacek Jukrojć, Dagmara Tejszerska, Zbigniew Nawrat: „Zastosowanie techniki cyfrowej rejestracji optycznej do określenia wielkości kinematycznych telemanipulatora Robin Heart Vision”. Roboty medyczne. Red.: Z. Nawrat. Zabrze: M-Studio 2007, s.109–116. ISBN: 978-83-88427-71-8.
7. Grzegorz Ilewicz, Robert Michnik, Jacek Jurkojć, Dagmara Tejszerska¹, Zbigniew Nawrat, Joanna Śliwka. Zastosowanie systemu wizyjnego do opisu ruchu narzędzi torakoskopowych w trakcie modelowania procedur minimalnie inwazyjnych na sercu odzwierzęcym. Badania pilotażowe.
8. Dagmara Tejszerska, Grzegorz Ilewicz. Studium czynności ruchowych końcówki operacyjnej telemanipulatora kardiochirurgicznego.
9. Ramon Berguer, Surgery and Ergonomics, Arch Surg. 1999;134:1011–1016.