

dr inż. Paweł Kostka  
Fundacja Rozwoju Kardiochirurgii, Zabrze  
Politechnika Śląska w Gliwicach, Instytut Elektroniki

dr Zbigniew Nawrat  
Fundacja Rozwoju Kardiochirurgii, Zabrze

mgr inż. Wojciech Dybka  
Fundacja Rozwoju Kardiochirurgii, Zabrze

mgr inż. Kamil Rohr  
Fundacja Rozwoju Kardiochirurgii, Zabrze

dr Zbigniew Małota  
Fundacja Rozwoju Kardiochirurgii, Zabrze

## **Optymalizacja interfejsu chirurg-telemanipulator. Zintegrowana konsola sterująca systemu Robin Heart**

*Prezentowana praca przedstawia stan aktualny oraz projekt rozwoju, rozwiązania interfejsu człowiek-maszyna opracowanego dla systemu polskiego telemanipulatora chirurgicznego Robin Heart. Zgodnie z ideą stanowiska operatora-chirurga opartej na założeniu, że całość konstrukcji odpowiada naturalnej sytuacji pracy chirurga „we wnętrzu pacjenta”, co skutkuje umieszczeniem końcówek zadajnika Master nad operatorem, opracowano nowy projekt zintegrowanej jednostki centralnej z kilkoma kanałami przepływu informacji z podstawowego toru wizyjnego i sterowania oraz sygnałów pomocniczych. Konsola sterownicza Robin Heart Shell® wyposażona jest w zadajniki Master dla pozycjonowania dwóch ramion narzędziowych oraz pedały nożne dla sterowania ruchami trzeciego ramienia kamery toru wizyjnego. Istotnym, nowym elementem, nad którym trwają obecnie prace, jest wprowadzenie autorskiego rozwiązania obrazowania 3D sygnału wizyjnego z pola operacji w miejsce istniejącego obrazowania 2D.*

### **THE CONTROL CONSOLE OF SURGICAL ROBOT ROBIN HEART**

*Current state and the assumptions of development of surgeon-machine interface for polish Robin Heart telemanipulator is presented. For the main idea basing on assumptions, that the whole construction corresponds to natural surgeon environment “in the inner space of patient body” new project of the integrated information flow in this central control station was prepared. Significantly new element of this project is the idea of 3D (to replace current 2D system) visualization for the operation field image.*

## **1. WPROWADZENIE, STAN AKTUALNY KONSOLI STERUJĄCEJ SYSTEMU ROBIN HEART**

W 2000 roku Fundacja Rozwoju Kardiochirurgii w Zabrzu rozpoczęła polski projekt robota kardiochirurgicznego finansowany przez Komitet Badań Naukowych [1]. Zorganizowano zespół obejmujący zarówno specjalistów z zakresu medycyny jak i techniki, z kilku ośrodków naukowych w Polsce (Łódź, Warszawa, Zabrze) by w ramach posiadanych środków skonstruować precyzyjne narzędzie dla chirurgów do operacji na sercu. Powstała

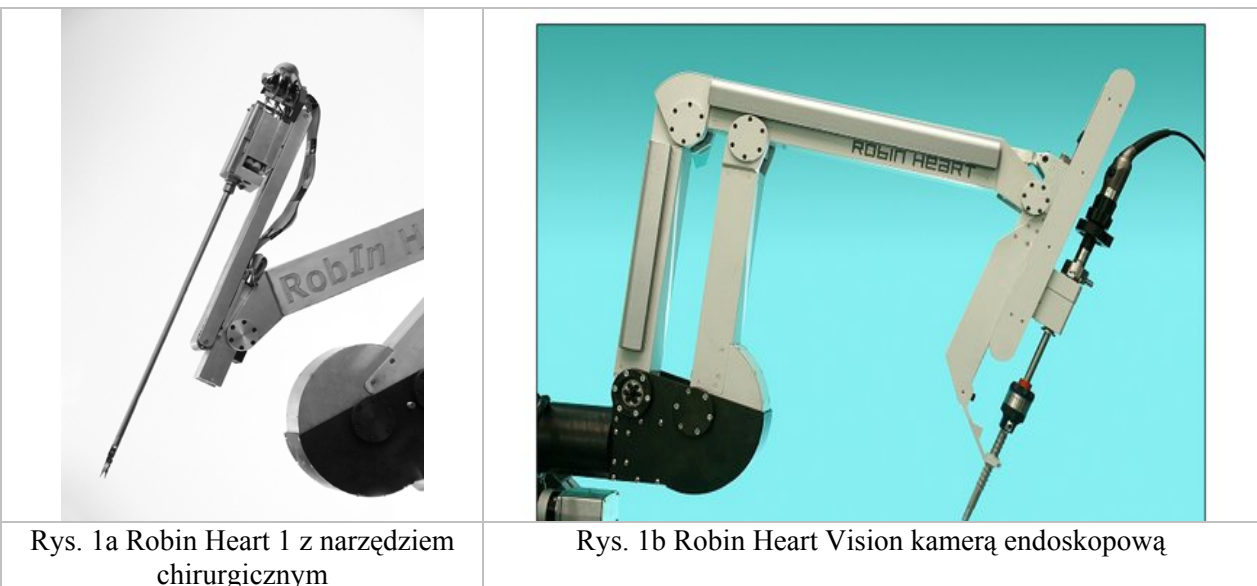
rodzina ramion robota kardiochirurgicznego RobIn Heart (rys. 1), ma strukturę segmentową umożliwiającą zestawienie sprzętu dla różnych typów operacji. Sam oddzielny człon stanowi sterowana głosem lub za pomocą zadajnika kamiera endowizyjna – Robin Heart Vision (rys. 1a).

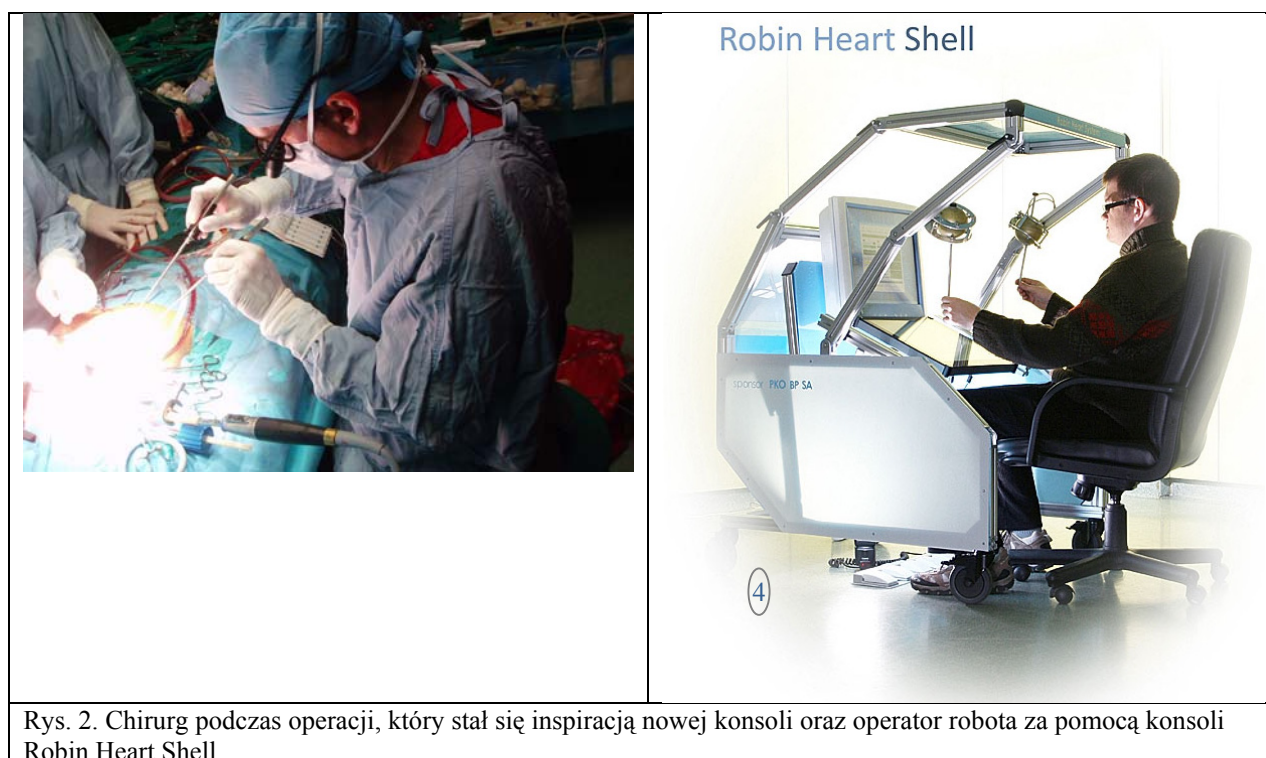
Podstawowym zadaniem układu zadajnika położenia/ prędkości/przyśpieszenia (lub innych wielkości fizycznych) w systemie telemanipulatora jest mapowanie ruchów operatora chirurga przetwarzanych następnie przez układ sterujący, wypracowujący sygnały sterujące dla ramienia wykonawczego [2], [3], [4]. Telemanipulator służący do wykonywania operacji chirurgicznych posiada specyficzne cechy, które są związane z wymaganą wysoką precyzją narzędzia (skalowanie, dokładność, powtarzalność), geometrią wiążącą obiekt operacji z zewnętrznym ramieniem robota (stałopunktowość) oraz wymaganiami medycznymi (sterylność części roboczych). Opierając się na wyżej wymienionych cechach robota 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.

Efekt ruchów „lustrzanych” – kierunek ruchów narzędzia na zewnątrz ciała pacjenta jest odwrotny do kierunku ruchu końcówek wewnątrz ciała – układ sterujący powinien to wyeliminować zapewniając zgodność kierunku ruchów chirurga z ruchami końcówki narzędzia obserwowanymi przez niego na monitorze.

Ergonomiczna konsola sterownicza powstaje przy ścisłym współdziałaniu z lekarzami i studentami. W latach 2000-2006 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. W ramach rozpoczętego w połowie 2009 roku projektu trwają prace w kierunku optymalizacji ‘wejścia’ systemu (*Man-Machine Interface*).





Rys. 2. Chirur podczas operacji, który stał się inspiracją nowej konsoli oraz operator robota za pomocą konsoli Robin Heart Shell

Konsola Robin Heart Shell (rys. 2b) rozwiązuje zarówno problem ergonomii operowania, jaki i optymalizuje położenie wszystkich elementów wpływających na skuteczność pracy chirurga stanowiąc wygodne miejsce pracy. Jej funkcjonalność można ująć następująco:

1. Całość konstrukcji odpowiada naturalnej sytuacji pracy chirurga „we wnętrzu pacjenta” (pamiętajmy, że chirurg pracuje „na powiększonym obrazie pola operacyjnego”). Uchwyt sterujący położeniem narzędzia (rys. 3b) można wygodnie ustawić względem operatora. Chirurg trzyma jakby za końcówkę narzędzia. Punkt stały, przegub obrotowy znajduje się na wysokości głowy operatora.
2. Monitor obserwacyjny (rys. 3a) znajduje poniżej, pod niewielkim kątem do poziomu – podobnie jak pole operacyjne podczas operacji chirurgicznej.
3. Chirurg operuje uchwytami nad monitorem równocześnie obserwując efekt – ruch narzędzi.
4. Podnosząc wzrok o niewielki kąt ma przed oczami monitor umożliwiający obserwację informacji diagnostycznych wykonanych przed operacją, bazy doradczej oraz sygnałów monitorujących stan pacjenta podczas operacji. Konfiguracja monitora dotykowego może być zmieniona bezpośrednio palcem, głosem, pedałem lub innym zadajnikiem ruchu.
5. Pedały są umieszczone w wygodnej pozycji umożliwiając sterowanie kamery endoskopowej lub odsprzęglając cały układ mechaniczny.

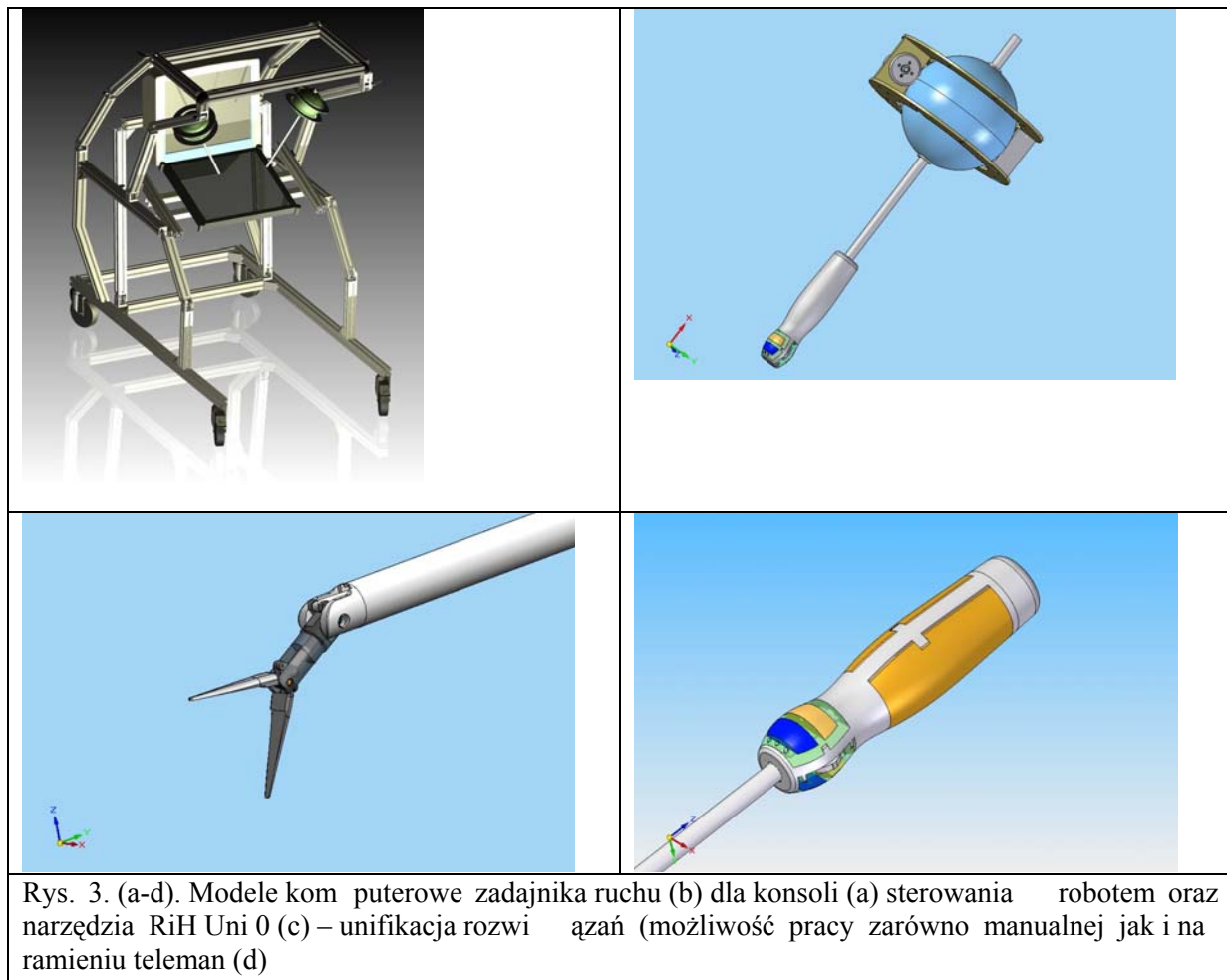
Cechą charakterystyczną konstrukcji jest oparcie jej na naturalnej idei operatora umieszczonego wewnątrz przestrzeni operacji, która została uzyskana przez zawieszenie przegubu obrotowego zadajników ruchu nad głową operatora oraz monitorem (2D lub 3D) w części dolnej – swobodnie operator patrzy w dół pod wybranym kątem. Operator przesuwając wygodne położenie zadajniki ruchu o kształcie przypominającym narzędzie, operuje

zadajnikami bezpośrednio nad monitorem, co daje wygodną (szczególnie w fazie uczenia) możliwość równoczesnej obserwacji ruchu dłoni z zadajnikiem oraz efektu zadanego ruchu (ruchu narzędzi w polu operacyjnym zobrazowanym na monitorze). Wielu chirurgów wskazywało na kłopoty wynikające z braku możliwości obserwacji zadajnika i pedałów bez utraty kontaktu wzrokowego z polem operacyjnym. Pod monitorem, w dobranej przez chirurga lokalizacji znajdują się pedały do sterowania torem wizyjnym i odsprzęgania układu mechanicznego. Przez otwory naturalne lub dwa, trzy nacięcia (odpowiednio oprawione – troakar) w powłokach ciała pacjenta wprowadzone w pole operacyjne są narzędzia chirurgiczne (nożyczki, kleszczyki itp.), przez kolejny – wizyjny tor endoskopowy, za pomocą którego tworzony jest obraz pola operacyjnego. Można rozważyć też wprowadzenie kolejnej kamery pokazującej obraz z innego ujęcia lub obraz całkowity np. typu panoramicznego. W konsoli zamocowane są minimum dwa monitory: jeden obserwacyjny nad kolanami operatora, drugi wyżej na wprost – monitor techniczny.

Monitor techniczny jest m oże być podzielony wg uznania operatora na kilka obszarów. Wśród opcji są: panel ustawiania parametrów sterowania (szybkość działania, skala ruchu, poziom odcięcia drżenia itp.), monitoring stanu pacjenta (EKG, Ci śnienie, Pulsoksymetr, Saturacja itp.), program doradczy (inteligentna baza danych obejm ująca informacje diagnostyczne pacjenta, historię choroby, plan operacji, m odelowanie operacji, zadan ą choreografię narzędzi i dobór narz ędzi w ró żnych 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.

Cechami charakterystycznymi konsoli są [1]:

1. naturalna idea „operator w polu operacyjnym”
2. naturalne sterowanie zadajnikami tuż nad monitorem
3. wygodna ażurowa konstrukcja umożliwiająca dopasowanie wszystkich elementów wpływających na ergonomię pracy oraz kontakt z otoczeniem (jeśli konsola znajduje się na sali operacyjnej)
4. układ przekazu informacji umożliwiający w wygodny sposób zarówno kontakt ze światem zewnętrznym, korzystanie on-line z systemu doradczego (efekt pracy bioinżynierów analizujących operację m.in. za pomocą modelowania)
5. specjalny, niespotykany w innych rozwiązaniach system elektromechaniczny zadajnika ruchu, który łączy zalety:
  - precyzji orientacji narzędzia
  - sterowanie wygodnie znaczną liczbą funkcji dodatkowych
  - wygody umożliwiającej długi czas pracy bez zmęczenia
  - naturalnej pozycji dla pracy chirurga endoskopowego.
6. przegub i cały mechanizm zadajnika zawieszony jest nad głową operatora (w „dachu” konsoli) dzięki czemu, zgodnie z obecnymi standardami cała przestrzeń jest wolna wokół operatora, może być modyfikowana, operator może swobodnie zaprojektować, ustawić zarówno monitory, zadajniki i pedały.



Rys. 3. (a-d). Modele komputerowe zadajnika ruchu (b) dla konsoli (a) sterowania robotem oraz narzędzia RiH Uni 0 (c) – unifikacja rozwiązań (możliwość pracy zarówno manualnej jak i na ramieniu teleman (d))

## 2. ZAŁOŻENIA PROJEKTU OPTYMALIZACJI INTERFEJSU CHIRURG-TELEMANIPULATOR CHIRURGICZNY

Celem projektu jest wykonanie konsoli sterowania robotem Robin Heart oraz odpowiednich stanowisk edukacyjnych do treningu i badań ergonomii pracy chirurga podczas robotycznego wspomaganie operacji małoinwazyjnych. System zostanie zoptymalizowany 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- i OFF-line, dla chirurga operatora – zagadnienia do dzisiaj nie rozwiązane w sposób właściwy w żadnym tego typu urządzeniu. Opracowane rozwiązania będą oryginalne w skali światowej i opracowane prototypy oraz modele będą stanowiły podstawę przygotowania dokumentacji dla przygotowania wdrożenia trzech produktów:

- A. konsoli sterowania robotem Robin Heart,
- B. konsoli edukacyjnej Robin Heart Duo Teacher,
- C. konsoli edukacyjnej do środowiska Wirtualnej Sali Operacyjnej.



Przedmiot proponowanego projektu stanowi najważniejszy z punktu widzenia przyjęcia przez odbiorców – lekarzy chirurgów składowy, pełnego zrobotyzowanego systemu chirurgicznego, składającego się właśnie z interfejsu chirurga ( *narzędzie Master*), układu sterowania oraz ramienia wykonawczego (*ramię Slave*).

Proponowane rozwiązania będą stanowić element pierwszego europejskiego robota kardiochirurgicznego Robin Heart oraz systemu edukacyjnego treningowego mini inwazyjnej chirurgii. System edukacji może być wykorzystywany niezależnie od projektu wdrożenia robota Robin Heart, lecz stanowi równocześnie niezbędny element strategii wdrożenia naszego robota.

Ergonomia układu zadajnika przekazującego wolę chirurga 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.**

Realizacja projektu stanowi kompleksowe i optymalne rozwiązanie problemu interfejsu użytkownika robota chirurgicznego z punktu widzenia: ergonomicznego, praktycznego, wdrożeniowego, ekonomicznego (opracowanie technologii produkcji konsol edukacyjnych i klinicznych) i naukowego.

Zakładane, szacowane wartości najważniejszych parametrów konsoli sterującej (narzędzie typu Master) systemu robota chirurgicznego oraz laparoskopowego stanowiska treningowego

Nazwa parametru docelowego	Wartość parametru
1. Liczba sterowanych narzędzi laparoskopowych (ramion robota)	2 + endoskop wizyjny
2. Liczba stopni swobody zadajnika HAPTIC (dla jednego ramienia)	3 (dla ramienia) + 4 (dla narzędzia lap.) lub +1 (dla endoskopu wizyjnego)
3. Haptic-Feedback (sprężenie siłowe)	dla dwóch osi
4. Zakres przestrzeni roboczej	około: 20 x 20 x 20 cm
5. Maks. wartość obciążenia chwilowego /ciągłego(kilka h)	10 N / 3 N
6. Szacowana wartość siły tarcia	0,1 N
7. Sztywność	5 N/mm
8. Nominalna rozdzielczość systemu	0,5 stopnia (dla obr.) / 0,5 mm (dla lin.)
9. Inercja systemu	< 200 g
10. Częstotliwość odświeżania stanu systemu (mapowania ruchów operatora (Master) na ruchy narzędzia wykonawczego (Slave))	> 200 Hz

Techniczne uzbrojenie stanowiska operacyjnego w zakresie nowych małoinwazyjnych technik chirurgicznych, tj. laparoskopowych i endoskopowych dotyczy zasadniczo dwóch zagadnień:

- Zewnętrznej w stosunku do pola operacyjnego manipulacji narzędziami, która może być realizowana:
  - ręcznie przez lekarza manipulującego narzędziem i dłońmi przez specjalne uchwyty zadającego ruchy mili- i mikronarzędzi znajdujących się na końcu narzędzia laparoskopowego
  - z zastosowaniem sztucznych manipulatorów (telemanipulatorów lub robotów) np. sterowanych zdalnie, które zamocowane na odpowiednich układach nośnych zapewniają precyzyjne pozycjonowanie narzędzia laparoskopowego, najczęściej w zakresie trzech stopni swobody dotyczących pozycjonowania końcówki w przestrzeni operacyjnej.
- Realizacji leczniczych działań chirurgicznych w polu operacyjnym w zakresie modyfikacji stanu ustroju poprzez cięcie, preparowanie lub usuwanie tkanek, szycie itp.

Jeśli zwiększamy możliwości ruchowe ( stopnie swobody) końcówki narzędzia to musimy odpowiednio dostosować uchwyt, by można było je uruchomić i nimi kierować. Uchwyt który znamy w laparoskopii najczęściej pozwala na obrót, wsuwanie i zaciśnięcie narzędzia.

Głównym problemem, było sterowanie położeniem dodatkowych stopni swobody końcówki narzędzia (sama końcówka narzędzia ma 4 stopnie swobody). Aby uruchomić, w szczególności nienaturalny dla dłoni zakres ruchu narzędzia zastosowaliśmy krążki obrotowe, które można było ustawiać wolnymi placami dłoni opartej o uchwyt. Zadajnik ruchu sterowany jest intuicyjnie: ruch w dół oznacza ruch w dół narzędzia w polu operacji itp. Trzymadło w kształcie długopisu lub wygodny, oryginalny uchwyt i podwieszenie dłoni (ze sprężyną równoważącą system mechaniczny zadajnika) pozwala na swobodne poruszanie palcami, które za pomocą zacisków (jak pęseta), przycisków, pokręteł, mikrodrojstików w wygodny, nie zakłócając stabilnej manipulacji orientacją narzędzia pozwala sterować znaczną liczbą dodatkowych stopni swobody (ruchów elementów z przegubami typu nadgarstek narzędzia lub funkcji narzędzi – np. automatycznej wybranej sekwencji ruchów dodatkowych funkcji np. automatycznego zszywania tkanek).

### 3. WNIOSKI

Uchwyt, który opracowaliśmy dla konsoli i narzędzia Robin HeartUni 0, wykorzystany został podczas eksperymentu na zwierzętach w styczniu 2009. Zawierał on zdublowane (dla lewo i praworęcznych) potencjometry i mikrodrojstiki do uruchamiania ruchu we wszystkich stopniach swobody końcówki. 3 DOF orientacyjne są realizowane za pomocą orientacji w przestrzeni pręta umieszczonego w kuli z enkoderami w części równoleżnikowej i południkowej + suw. Chirurg sterował z powodzeniem robotem wyposażonym w narzędzie o 6 DOF. Następnie wykonał część operacji orientując manualnie narzędzie odłączone od ramienia robota – wyposażone w identyczną architekturę przycisków sterowania jak rączka w konsoli (uniwersalność funkcjonalna).

Projekt rozwojowy konsoli sterującej prócz poprawy ergonomii narzędzia zadajnika, zakłada opracowanie i testy trójwymiarowej wizualizacji pola operacyjnego na monitorze 3D oraz systemie optycznym z wziernikiem dla podglądu chirurga jak również wprowadzenie sprzężenia siłowego dostarczającego operatorowi wrażenie ‘czucia’ proporcjonalne do siły

oddziaływania narzędzia laparoskopowego o tkanki w polu operacyjnym . Te innowacyjne systemy wprowadzone zostaną również do stanowiska treningowego laparoskopii oraz wirtualnej sali operacyjnej.

**Podziękowania:**

*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”.*

**LITERATURA:**

- [1] Z. Nawrat, W. Dybka, P. Kostka, K. Rohr. Konsola sterowana robotem chirurgicznym Robin Heart. PAR Pomiary Automatyka Robotyka. Miesięcznik Naukowo- Techniczny; nr 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,