

# Robin Heart czyli jak pokonać odległość i wykorzystać człowieka jako element układu sterowania telemanipulatora

Robin Heart or how to overcome the distance and use a man as an element of the telemanipulator control system

Artykuł recenzowany

ZBIGNIEW NAWRAT<sup>1,2</sup>,  
DARIUSZ KRAWCZYK<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Fundacja Rozwoju Kardiochirurgii  
im. prof. Zbigniewa Religi, Zabrze  
<sup>2</sup>Katedra Biofizyki, Wydział Nauk  
Medycznych w Zabrze,  
Śląski Uniwersytet Medyczny  
w Katowicach

*Słowa kluczowe:*  
roboty chirurgiczne,  
telemanipulatory, teleoperacje

*Keywords:*  
surgical robots,  
telemanipulators,  
teleoperations

**Motto:** *Po postępach tele-komunikacji czyli przesyłania na odległość informacji czas na rozwój tele-akcji, czyli przesyłania na odległość działania. Do tego niezbędne są roboty. I człowiek. ZN*

## Streszczenie

*Celem wprowadzenia robotów jest poprawa skuteczności, precyzja, powtarzalność (standaryzacja) i zmniejszenie inwazyjności zabiegów chirurgicznych. Obecnie roboty medyczne stosowane w chirurgii to telemanipulatory – czyli wszystkie decyzje są podejmowane przez chirurga - operatora robota. Teleoperacje pozwalają na rozszerzenie grupy pacjentów, u których skuteczna ingerencja chirurgiczna jest możliwa pomimo braku obecności specjalisty w miejscu przebywania pacjenta. Zdalnie sterowany robot przenosi na odległość funkcje motoryczne i sensoryczne operatora. Człowiek, operator robota chirurgicznego, powinien być traktowany jako element systemu sterowania powiązany przez system informatyczny i działanie układu elektromechanicznego robota z narzędziem wykonawczym. Prowadzone są w FRK prace nad dodaniem wycucia siły i wzbogaceniem zbioru informacji dostępnych w konsoli dla operatora o obraz rzeczywisty wzbogacony o przetworzone dane diagnostyczne, planowanie i symulacje efektów operacji. Artykuł omawia szereg aspektów dotyczących sprzężenia siłowego, teleoperacji i pionierskie w Polsce doświadczenia załóżki Robin Heart Team.*

## Abstract

*The purpose of the introduction of robots is to improve efficiency, precision, repeatability (standardization) and reduce the invasiveness of surgical procedures. Currently, medical robots used in surgery are telemanipulators - that is, all decisions are made by a surgeon - a robot operator. Teleoperations allow the expansion*

*of the group of patients in whom effective surgical intervention is possible despite the absence of a specialist at the patient's location. The remote-controlled robot transfers the motor and sensory functions of the operator at a distance. A human being, a surgical robot operator, should be treated as an element of the control system connected by the IT system and operation of the robot's electromechanical system with an executive tool. FRK is working on adding a sense of strength and enriching the set of information available in the operator's console with a real image enriched with processed diagnostic data, planning and simulation of effects of operations. The article discusses a number of aspects related to force feedback, teleoperation and the pioneering experiences of the Robin Heart Team in Zabrze.*

## ■ ROBIN HEART

W Fundacji Rozwoju Kardiologii im prof. Zbigniewa Religi w Zabrze (FRK) w ramach pionierskich prac nad robotami chirurgicznymi powstało kilkanaście modeli i prototypów tych nowoczesnych narzędzi chirurga [1]. Robin Heart powstał z inicjatywy jednego z autorów tej publikacji ale to Profesor Zbigniew Religa był kierownikiem pierwszego grantu poświęconego Robinowi i również autentycznym entuzjastą tej technologii. Bez Jego zaangażowania trudno sobie wyobrazić uruchomienie tego projektu. Budowa i testy każdego z robotów stanowiły kolejny etap dojrzewania koncepcji i... zespołu zbliżając do zaofiarowania pierwszego produktu rynkowego.

W latach 2000-2003 powstały modele Robin Heart 0, Robin Heart 1 i Robin Heart 2, w latach 2007-2008 Robin Heart Vision do sterowania położeniem endoskopowego toru, a w 2009 roku Robin Heart mc<sup>2</sup> (robot modułowy), pięć lat później TeleRobin [3] (nowe rozwiązanie platformy narzędziowej) – Rys.1, a następnie kolejne wersje robota toru wizyjnego; ultralekki Pelikan i Robin Heart PortVisionAble w wersji przedklinicznej.

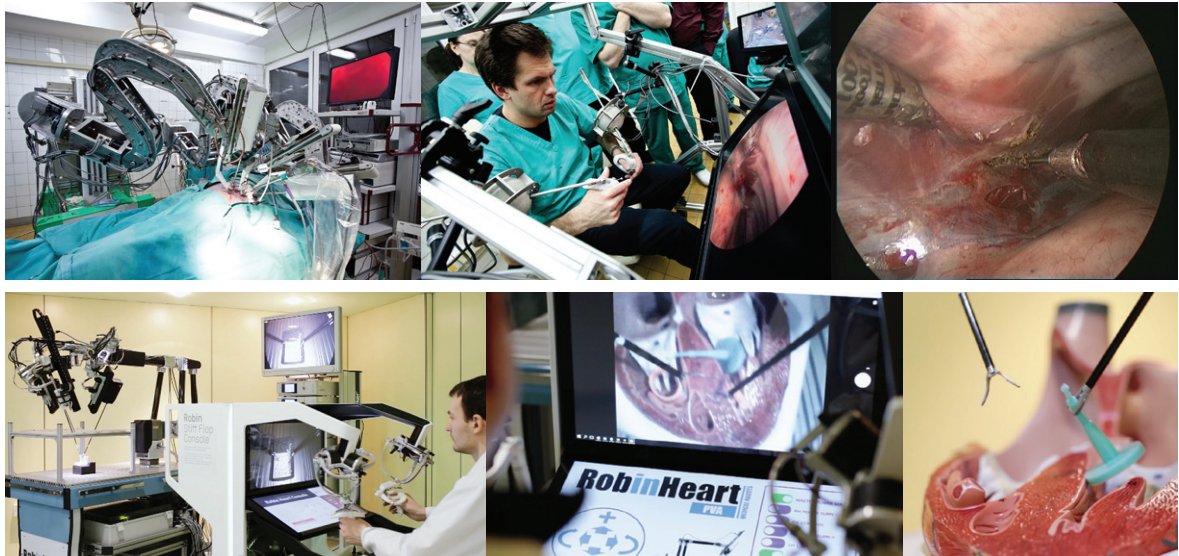
Robin Heart mc<sup>2</sup> był (może i jest jeszcze) w owym czasie największym robotem chirurgicznym, bo mógł pracować za trzy osoby przy stole operacyjnym: chirurga głównego (dwa narzędzia), asystenta (dwa narzędzia) i tego asystenta, który trzyma w dłoni tor wizyjny (endoskop). Robot ma trzy ramiona ale maksymalnie można na nich umieścić 5 narzędzi. Jego zaletą jest (będąca przedmiotem oryginalnego wynalazku) platforma, która właściwie stanowi w wersji mini ale w pełni funkcjonalnego robota chirurgicznego (2 narzędzia i tor wizyjny). Dzięki temu niektóre operację zamiast trzech chirurgów, może wykonywać jeden specjalista zza konsoli Robin Heart Shell. Za pomocą odpowiednich zadaj-

ników ruchu steruje się całym urządzeniem (wybierając za pomocą sprzęgła nożnego, które narzędzia są uruchamiane). Konsola wyposażona jest w dodatkowy ekran dotykowy, który umożliwia zmianę parametrów sterowania, takich jak usunięcie drżenia czy przeskalowanie ruchu oraz system doradczy, który pokazuje potrzebne dane diagnostyczne oraz wyniki planowania i symulacji operacji. Robin Heart mc<sup>2</sup> jest oryginalnym, uniwersalnym robotem modułowym, narzędzia można szybko zdemontować z ramienia robota i sterować nimi ze specjalnego uchwytu w dłoni.

Modułowość oznacza też, że można pracować jednym ramieniem z platformą (narzędzie-wizja-narzędzie) 2+1 lub z dwoma asystującymi ramionami o dużej swobodzie ruchu (plus dwa narzędzia) czyli 4+1, lub ściągnąć platformę i na środkowym mamy wtedy tylko tor wizyjny (typowy układ 2+1 – czyli głowa w środku i dwa narzędzia z boków (system w pełni intuicyjny).

Robin Heart mc<sup>2</sup>, wraz z modelem Robin 1,2 i Vision, był testowany (Rys.1) w eksperymentach na zwierzętach w Centrum Medycyny Doświadczalnej Śląskiego Uniwersytetu Medycznego w latach 2009-2010 (operacja pęcherzyka żółciowego, pomostowania naczyń wieńcowych i operacja naprawcza zastawek serca) [1].

Roboty stałopunktowe, jak da Vinci i Robin Heart, muszą być ustawione tak by stały punkt tych sferycznych kinematycznie robotów stanowiło miejsce przecięcia powłok ciała pacjenta – gdzie wsunięte jest każde narzędzie. Każda zmiana ustawienia stołu operacyjnego musi być związana z nowym ustawieniem robota względem przesuniętego ciała pacjenta. Właśnie dlatego powstaje potrzeba zintegrowania układu sterowania stołu operacyjnego z tego typu robotami. Roboty mocowane do stołu



*Rysunek 1. Przeprowadzone testy robota Robin Heart mc2 w Centrum Medycyny Doświadczalnej Śląskiego Uniwersytetu Medycznego potwierdziły funkcjonalność przyjętych rozwiązań technicznych. Poniżej – Robin Heart Tele podczas testów w Pracowni Biocybernetyki IPS FRK [1, 2]*



*Rysunek 2. RobinHeart Team (FRK) wykonał pionierskie w Polsce badania w zakresie teleoperacji. Na zdjęciu po lewej eksperyment zdalnego sterowania robotem Robin Heart Pelikan w Kopalni Guido w Zabrze (poziom – 320 m), po prawej: model teleoperacji Zabrze-Katowice, z FRK do Centrum Medycyny Doświadczalnej Śląskiego Uniwersytetu Medycznego w Katowicach*

operacyjnego jak już nie produkowane Zeus, AESOP oraz Robin Heart Vision bez względu na przyjętą zasadę konstrukcji poruszają się ze stołem operacyjnym i ten problem nie występuje.

Robin Heart PortVisionAble, doskonalony i testowany w latach 2011-2017 powinien trafić wkrótce do klinik. To najprostsz, jednoramienny robot, sterowany pilotem. Przy stole operacyjnym może zastąpić asystenta, który trzyma tor wizyjny i przesuwają kamerę w miejsce operacji podczas gdy chirurg używa klasycznych narzędzi laparoskopowych. Na okładce tego numeru czasopisma znajduje się Robin Heart PVA w wersji starszej demonstrując system testowania robota z udziałem robota tzw. ósemki, która symuluje zaprogramowaną reakcję narzędzia z tkanką.

#### ■ TELEOPERACJE

10 lat temu wykonano w FRK pierwszą modelową teleoperację: kardiochirurg Joanna Śliwka (pracownik Śląskiego Centrum Chorób Serca w Zabrzu) sie-

dząc przy konsoli Robin Heart Shell umieszczonej w FRK w Zabrzu sterowała robotem umieszczonym w Katowicach w Centrum Medycyny Doświadczalnej Śląskiego Uniwersytetu Medycznego (CMD SUM) – Rys.2. W tej samej sali operacyjnej kilka miesięcy wcześniej wykonano eksperyment na świni, stosując robota Robin Heart mc<sup>2</sup>. W ramach współpracy z FRK firma Emitel zestawiała system przesyłu informacji na odległość, złożony z bezprzewodowego łącza radiowego punkt-punkt (13 km), systemu transmisji danych, sygnału audio-wideo z kilku źródeł wraz z konwersją sygnału analogowego na cyfrowy. Pomiar opóźnienia sygnału sterowania pomiędzy katowickim CMD SUM z FRK w Zabrzu robotem (1 ms) oraz obrazu (280 ms) świadczy o możliwym już dzisiaj do wykonania wycięcia pęcherzyka żółciowego. Opóźnienie przesyłu obrazu, na podstawie którego chirurg operuje, jest jednak zbyt duże do prowadzenia operacji na sercu [1,2].

RobinHeart Team, wykorzystując rozwijającą się sieć internetową wykonał następnie testy zdalne-

go sterowania robotem na lini Meksyk-Zabrze oraz serię eksperymentów teleoperacji z FRK w Muzeum Górnictwa, w kopalni Guido. Przygotowywane są kolejne eksperymenty w tym zakresie również wykorzystujące sieć 5G.

Zdalnie sterowane roboty pozwalają na przesyłanie na odległość możliwości działania. Telechirurgia pozwala dotrzeć z możliwością fachowej interwencji chirurgicznej tam i wtedy kiedy jest ona niezbędna, ale również zapewnić bezpieczeństwo personelu medycznego podczas operacji (o czym przekonaliśmy się wszyscy podczas epidemii COVID-19). Największym problemem technicznym jest opóźnienie przesyłu obrazu, które może uniemożliwić właściwe kontrolowanie działania robota.

### ■ STEROWANIE ROBOTEM

Układ sterowania zespołów napędowych robota pozwala na realizację przez efektor narzędzia robota określonych zadań.

Są różne sposoby przekazywania robotom przedmiotu i sposobu wykonania zadań. Można z robotem komunikować się za pomocą głosu, sterować ruchem gałki ocznej, gestami czy nawet falami mózgowymi. Zabrzeński zespół testował wszystkie sposoby, które umożliwiają precyzyjne sterowanie narzędziami chirurgicznymi budując odpowiednie interfejsy użytkownika.

Robot jest telemanipulatorem i powinien wykorzystywać w sposób najlepszy doświadczenia chirurga, w szczególności tego, który operuje w sposób mniej inwazyjny, czyli narzędziami endoskopowymi. Zatem do sterowania narzędzi należy wykorzystać dłoń chirurga. W FRK wykonano odpowiednie badania i scharakteryzowano typowe zakresy ruchu i sposoby pracy manualnej chirurgów [4]. Na tej podstawie zaprojektowano oryginalny zadajnik ruchu Robin Hand – Rys.3. Zgodnie z założeniami sterowanie zapewnia wymaganą dokładność, pozwala na skalowanie wielkości zadanej w celu zwiększenia 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 – dłoni chirurga (zadajnika położenia/prędkości i ewentualnie innych wielkości fizycznych) – na ruch ramienia wykonawczego poprzez wypracowywanie odpowiednich sygnałów sterujących dla jego napędów.

Robin Heart jest telemanipulatorem, więc powinien w optymalny sposób wykorzystywać cechy motoryczne człowieka, który nim steruje.



Rysunek 3. Robin Heart Tele i interfejsy użytkownika RobinHand

### ■ CZŁOWIEK JAKO ELEMENT SYSTEMU

Ergonomiczny telemanipulator winien w optymalny sposób wykorzystać motoryczne zdolności operatora. Wykonanie precyzyjnego ruchu związane jest z właściwym planowaniem i kontrolą ruchu. Korygowanie pozycji i wypełnianych funkcji narzędzi wymaga dobrej jakości obrazu i wszystkich aktualnych dodatkowych informacji z pola operacyjnego, w tym sprzężenia siłowego [2]. W pętli sprzężenia układu sterowania znajduje się człowiek. Sprzężenie w układzie regulacji odbywa się przez jego zmysły oraz mózg (pamięć, wiedzę, doświadczenie). W operacji ważny jest czas, precyzja, wybór zadania i jego właściwego sposobu wykonania.

Wyobraźmy sobie – dowodząc metodą „nie wprost” – że operator jest głuchy, niedowidzący lub ma zaburzenia czucia częściowe (hipestezja) lub całkowity brak odczuwania dotyku (abaestezja). Człowiek jako element układu sterowania jest tak dobry jak jego zmysły, wiedza i doświadczenie. Układ nerwowy człowieka ma określony czas reagowania na bodźce. System podejmowania decyzji zaś związany jest z doświadczeniem i treningiem specjalistycznym. Edukacja chirurga odgrywa równie ważną rolę jak jego wrodzone umiejętności. W tym tandemie maszyna–człowiek zbyt często skupiamy się na opisanu tylko maszyny zakładając, że potem prawidłowy system treningowy pozwoli na zgranie tego zespołu wykonawczego operacji. Jednak tak jak ograniczenia mają stosowane układy elektronapędowe, system przetwarzania informacji czy więzy i ograniczenia układu mechanicznego tak również człowiek posiada pewne ograniczenia zarówno w zakresie układu ruchu (a następuje przecież przeniesienie ruchu dłoni na ruch i działanie narzędzia) jak i postrzegania i wnioskowania. Jest to element podstawowy ergonomii telemanipulatora wpływający na skuteczność i bezpieczeństwo operacji.

Ergonomię w chirurgii podzielono za na ergonomię wizualizacji (przygotowanie pola operacji i oświetlenia, monitory), manipulacji narzędziami, postawy chirurga i warunków psychologicznych pracy [1].

Teleoperacja może być wykonywana dzięki aktywnej teleobecności chirurga i możliwości jego interakcji z pacjentem za pomocą robota. Teleobec-

ność chirurga osiąga się przez zapewnienie obrazu miejsca operacyjnego i możliwości aktywnego działania, ingerencji fizycznej w ciele pacjenta. Problem jak wiernie przekazać ruchy chirurga na manipulator robota i sprawić, aby ręka chirurga odczuła dotyk i opór, który napotyka manipulator, do dziś nie został rozwiązany w sposób zadawalający.

Postrzeganie wizualne, to w jaki sposób interpretowane są widziane obrazy, odgrywa kluczową rolę ponieważ 90% informacji przesyłanych do mózgu to informacje wizualne. Jak pisał Albert Mahrabian w pozycji „Silent Messages” 93% całej komunikacji człowieka to komunikacja niewerbalna [5]. Pamiętamy 80% z tego co widzimy, a jedynie 20% z tego co czytamy. Badania zespołu neurologów z Instytutu Technologicznego w Massachusetts (MIT) dowiodły, że mózg jest w stanie przetwarzać całe obrazy, które ludzkie oko widzi przez zaledwie 13 milisekund [6]. Badania wskazują, że człowiek posiada dużo doskonalszą pamięć do zapamiętywania treści wizualnych niż tekstu pisanego. Okazuje się, że oko ludzkie może zobaczyć 7 milionów kolorów. Najszybciej postrzegamy kolor żółty.

Wiedzę na temat postrzegania obrazów wykorzystuje telewizja ustalając standardy np. PAL i SECAM jest to 25 klatek na sekundę (w kinach standardowo – 24 klatki na sekundę). Uczestnicząc powszechnie w tym treningu człowiek nabywa też określone umiejętności np. „wycucia głębi” w obrazie płaskim. Gry komputerowe i inne systemy generowania grafiki w czasie rzeczywistym stosują różną częstotliwość wyświetlania obrazu (zależy też od wydajności sprzętu).

Zagadnieniu ergonomii w chirurgii jeden z autorów poświęcił kilka rozdziałów książki [1] poświęconej robotom Robin Heart. Idąc za tokiem myślenia przedstawionym w pracy [1] zacytujmy kilka fragmentów. Wiedza o motoryczności człowieka jest podstawowym zagadnieniem w projektowaniu zadajników ruchu telemanipulatora. Za jednego z twórców współczesnej teorii motoryczności uznaje się Bernsteina, który w pracy O strukturze ruchów (1947) zawarł jej podstawy. Rozpoczęcie ruchu jest według Bernsteina możliwe po wyobrażeniu celu i skonstruowaniu programu działania. „Wg Bernsteina czas obiegu informacji w organizmie wynosi 0,07–0,12 s. Oznacza to częstotliwość 8–14 Hz, która jest typowa dla rytmu  $\alpha$  fal mózgowych i tremoru mięśniowego. Na podstawie analizy szybkości obiegu informacji od receptora do efektora można twierdzić, że ruchy balistyczne są sterowane ante factum. Natomiast w ruchach ciągłych sterowanie odbywa się na zasadzie in facto. Pobudzenie mięśni wymaga stałego dopasowywania się  $\Delta W$  (wartości różnicowe) do zaistniałej sytuacji tak, aby możliwe było wykonanie zadania ruchowego” [7].

Sposób odczuwania maszyny przez człowieka jest związany z prawem Webera: stosunek wyczuwalnego przyrostu natężenia bodźca docierającego do człowieka ( $\Delta P$ ) do wartości bezwzględnej bodźca jest wielkością stałą. Jak wykazano doświadczalnie, ten ułamek Webera dla sił wynosi około 0,06, jednak poniżej 45 N rośnie nieliniowo. Oznacza to, że jeśli przy sile 100 N wyczuwa się zmiany sił o wielkości 6 N, to przy sile 10 N wyczuwa się siły o wartości 1,6 N (16%). Ilustruje to dylemat konstruktora: na ile można zmniejszyć obciążenie siłowe (zwiększając swobodę i wygodę pracy), by zachować właściwy zakres czułości na dzakajniku ruchu. Z trudności obiektywizacji i uogólnienia wynika potrzeba indywidualizowania tych parametrów dla danego użytkownika.

Podczas teleoperacji dochodzi problem przesunięcia czasowego między ruchem a jego obrazem na monitorze. W zależności od typu operacji i doświadczenia operatora demonstrowano właściwą skuteczność przy opóźnieniu od < 700 ms do < 150 ms.

Podsumowując [1]:

1. Chirurg wykorzystuje podczas pracy zdolności motoryczne zarówno kondycyjne, jak i koordynacyjne. Wygodna pozycja i sposób pracy w konsoli sterowania robotem pozwala pokonać problemy kondycyjne, które w klasycznej i laparoskopowej chirurgii mają istotne znaczenie. Telemanipulator winien w optymalny sposób wykorzystać motoryczne zdolności operatora.

2. Wykonanie precyzyjnego ruchu związane jest z właściwym planowaniem i kontrolą ruchu. Korygowanie pozycji i wypełnianych funkcji wymaga dobrej jakości obrazu i wszystkich aktualnych dodatkowych informacji z pola operacyjnego.

Podstawowym elementem pracy chirurga jest ... podejmowanie decyzji, niezwłocznie i zresztą zwykle w warunkach braku pełnej informacji niezbędnej do przeprowadzenia rzetelnej analizy sytuacji. Obszar niepewności można ograniczyć przez zastosowanie systemów doradczych i treningu. Dlatego tak ważne jest doświadczenie, które stanowi właściwa podpora nie tylko w kształtowaniu ruchu ale i w podejmowaniu decyzji. Podejmowanie decyzji przez człowieka opiera się na jednym z dwóch wzorców myślowych: kartezyjańskim (myślenie przyczynowo-skutkowe oparte na klasycznej logice, myślenie poprzedza działanie, „myślę .. więc decyduję”) lub darwinowskim (metoda prób i błędów, działanie poprzedza decyzje, „sprawdź efekt podjętej decyzji”).

W projekcie robota Robin Heart przykładaliśmy ogromną rolę badaniom interakcji człowiek-maszyna, ale zawsze rozpoczynaliśmy od obserwacji i pomiarów typowych aktywności ruchowych podczas operacji różnymi narzędziami, próbując rozwiązać też problem sposobu podejmowania decyzji podczas operacji przez chirurga [1]. Projektowanie robo-



Rysunek 4. Idea siłowego sprzężenia zwrotnego Robin Heart INCITE. Innowacyjne sensory i ich zastosowanie w narzędziu robota Robin Heart

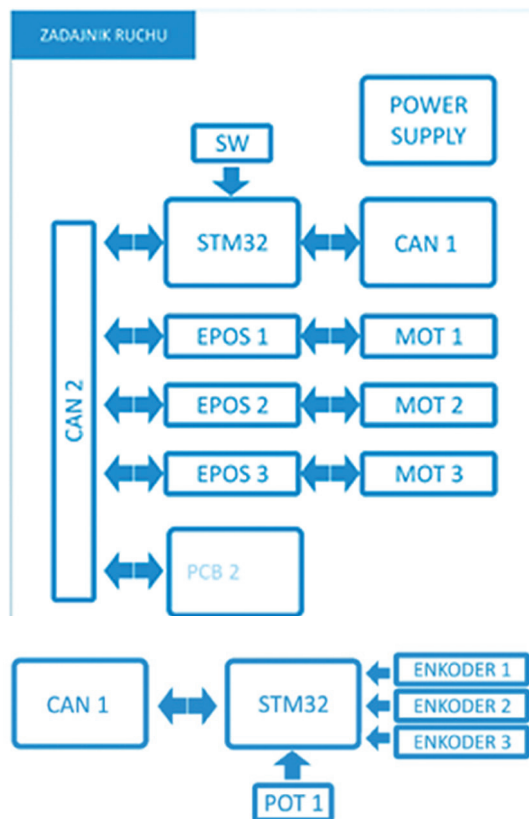
ta Robin Heart rozpoczęło się od badań... człowieka. Człowieka, który będzie operatorem robota, jego użytkownikiem, który będzie odpowiedzialny za cały przebieg operacji i jej efekty.

#### ROBIN HEART Z CZUCIEM

Roboty i mechatroniczne narzędzia chirurgiczne wymagają zastosowania specjalnej technologii sensorowej. Najlepszym przykładem są ilustrującym problem są narzędzia wykonawcze robota Robin Heart, w których zastosowano dwa czujniki 3D siły (wynik projektu EU INCITE) – Rys.4. Węgierscy partnerzy projektu – EK MFA, 3D Silicon – pod kierunkiem Petera Fürjes zaprojektowali i wykonali piezorezystywne czujniki do montażu bezpośrednio w części wykonawczej (efektorze) narzędzia chirurgicznego. Czujniki wykonane zostały w technologii MEMS bazując na czterociałowych waflach krzemowych i borokrzemianowych [8].

Zadajnik Robin Hand jako element sterowania został opisany w kilku pracach zespołu Mucha, Lis, Lechrich, Krawczyk, Fraś, Nawrat [9, 10]. Zadajnik wyposażony jest w sensory umożliwiające określenie położenia oraz orientacji dłoni chirurga, dodatkowo posiada napędy umożliwiające generowanie siły oddziaływującej na operatora.

Urządzenie – Rys.5 – sterowane za pomocą mikrokontrolera STM32F4 składa się z zasilacza, mikrokontrolera ARM, trzech sterowników silników typu Epos2, trzech silników BLDC (ang. *BrushLess Direct-Current motor*) oraz przycisku nożnego. Magistrala CAN1 służy do komunikacji z urządzeniami zewnętrznymi (Robot, Narzędzie mechatroniczne, konsola sterowania), a CAN2 służy do wymiany danych wewnątrz zadajnika ruchu. Przycisk nożny SW służy do uruchomienia silników BLDC, które służą jako enkodery do ustalenia współrzędnych pierwszych trzech stopni swobody oraz do generowania siły oddziaływującej na rękę chirurga. W części sta-



Rysunek 5. Schemat blokowy zadajnika Robin Hand [9]

nowiącej uchwyt operatora mikrokontroler Stm32 informację o położeniu dłoni chirurga z trzech enkoderów absolutnych (cyfrowa magistrala SSI) oraz potencjometru liniowego (zaciskanie szczęk narzędzia) wysyła za pomocą wewnętrznej magistrali CAN do mikrokontrolera głównego znajdującego się w części górnej zadajnika ruchu.

Wzmocniony sygnał wyjściowy (rezystancyjny) z dwóch sensorów narzędzia trafia na wejście przetwornika analogowo-cyfrowego w mikrokontrolerze STM32. Pomiar rezystancji dokonywany jest z wykorzystaniem pętli automatycznej regulacji wzmocnienia. Wzmocnienie toru pomiarowego jest regulowane w sześciu zakresach. Rozwiązano również problem pomiaru małych i znacznych sił (np zaciąganie węzła czy zetknięcie z kością). Mikrokontroler (automatyczna regulacja wzmocnienia w sześciu zakresach) dobiera zakres pomiarowy, tak aby pomiar małych sił ( $\leq 1N$ ) odbywał się z jak największą dokładnością. Z kolei przy pomiarze dużych sił ( $> 1 N$ ) wzmocnienie jest zmniejszone, aby uzyskać szerszy zakres pomiarowy [9].

Samodzielny jednoramienny robot toru wizyjnego podczas operacji mechanicznymi narzędziami endoskopowymi może być sterowany z pilota umieszczonego na narzędziu laparoskopowym lub klasycznego pilota (podobnie jak regulacja położenia stołu ope-

racyjnego). Haptyczne zadajniki ruchu Robin Hand są elementem konsoli sterowania pełnym robotem chirurgicznym (np. Robin Heart Tele lub Robin Heart mc2). Robot napędzany jest poprzez silniki BLDC kontrolowane (magistrala Can2.0B) poprzez sterowniki EPOS, posiada własny mikrokontroler ARM odpowiedzialny za kontrolowanie pozycji robota. We wspólnej sieci CAN działa system robot-konsola oraz mechatroniczne narzędzie laparoskopowe zintegrowane z robotem Robin Heart.

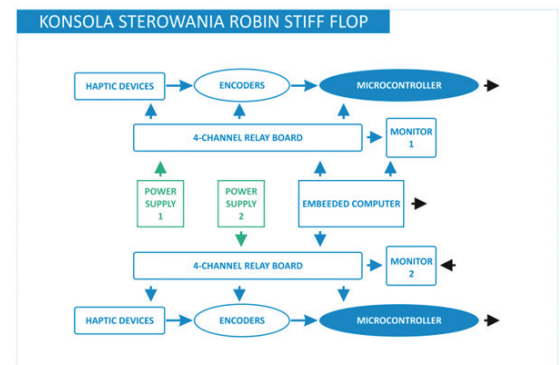
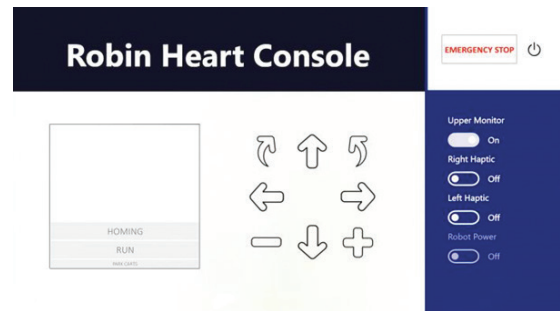
W artykule [9] opisano stanowisko badawcze (Rys. 4 i 6) optymalizacji działania systemu haptycznego sterowania złożone z konsoli sterowania RobinStif-Flop z zadajnikiem ruchu Robin Hand, robot Robin Heard PVA oraz narzędzie Robin Incite działają w systemie sterowania zamkniętego oraz wstępne wyniki badań. Układ elektroniczny konsoli posiada strukturę modułową. Moduł główny konsoli jest zbudowany na bazie miniaturowego komputera z systemem operacyjnym Windows IOT (sterowanie i wyświetlanie grafiki na monitorze). Pozostałe moduły stanowią dwa siedmiostopniowe zadajniki ruchu z sprzężeniem siłowym RobinHand oraz przekątnikowy układ zasilania umożliwiający włączanie i wyłączenie poszczególnych zespołów (urządzeń) peryferyjnych.

Sygnal, informacja o pozycji i orientacji dłoni operatora trafia do mikrokontrolera sterującego, który po przeliczeniu równań opisujących kinematykę manipulatora wysyła rozkazy ruchów do poszczególnych napędów z pomocą magistrali CAN. Operator podejmuje decyzję o wykonaniu określonego ruchu i wykonaniu zadania przez narzędzie na podstawie obrazu z kamery umieszczonej na ramieniu robota oraz odpowiednio przetworzonej informacji siłowo-oporowej zwrotnej z pola operacyjnego odczuwanego na zagajniku ruchu. To system zdalnego sterowania, który jest przygotowywany do kolejnych eksperymentów teleoperacji na różnych dystansach i w różnych warunkach. Przesyłanie danych (komunikacja odbywa się za pomocą protokołu TcpIP) może odbywać się w sposób bezprzewodowy lub tradycyjnym łączem internetowym. Do tego celu wykorzystywane są dwa media konwertery do transmisji obrazu z kamery endoskopowej oraz dwa media konwertery które umożliwiają tunelowanie magistrali CAN poprzez TCP-IP. Komunikacja ze względów bezpieczeństwa powinna odbywać się wydzielonym kanałem transmisyjnym w warstwie sieci VLAN.

Prowadzone są intensywne badania nad sposobem prezentacji zbioru informacji optymalnym dla chirurga – operatora.

## ■ PODSUMOWANIE

Potrzebujemy – dla bezpieczeństwa i jakości systemu zdrowia – systemów telemedycznych, zarówno biernych (informacyjnych) jak i aktywnych (robo-



Rysunek 6. Schemat systemu badawczego sterowania ze sprzężeniem siłowym robota Robin Heart [9]

tów). Potrzebujemy robotów – z powodów demograficznych, różnych barier naturalnych czy wywołanych przez ludzi albo też po prostu braku specjalisty na miejscu w którym podejmowana powinna być akcja ratowania człowieka (który w ułamku chwili zamienia się w pacjenta).

Chirurg jest tak dobry jak dobre są jego zmysły. Dopóki nie usamodzielnimy robotów (tzn. nie wyposażymy je w adekwatne do zadań sensory i systemy podejmowania decyzji AI) i stosujemy telemanipulatory musimy podejmować wszelkie wysiłki, by oddalony od pacjenta chirurg mógł wykorzystywać wszystkie swoje zmysły podczas zdalnego nadzorowania pracy robota. Jednym z elementów testowanych podczas naszych eksperymentów teleoperacji był również system połączenia akustycznego i obrazowego z całą salą operacyjną. Tam pracuje przecież zespół, który wspomaga operację (wymiana narzędzi, anestezja, krążenie pozaustrojowe itp.) którym również zarządza operujący chirurg. Intuicyjne sterowanie ze sprzężeniem siłowym pozwoli na zwiększenie skuteczności operowania – dlatego taką wagę przykładamy do rozwoju tej funkcjonalnej cechy robota Robin Heart.

Człowiek, operator robota chirurgicznego, może być traktowany jako element systemu sterowania powiązany przez system informatyczny i działanie układu elektromechanicznego robota z narzędziem wykonawczym (bierzemy tu pod uwagę zarówno przetwarzanie informacji w mózgu, jak i zależną od niego koordynację ruchową precyzyjnego sterowania poprzez interfejsy robota) [2].

Najważniejszym czynnikiem wpływającym na przyszłość teleoperacji będzie miał rozwój sieci łączności. Wdrożenie technologii 5G umożliwi zmniejszenie opóźnienia o rząd wielkości i podniesienie jakości obrazu. Czas opóźnienia informacji obrazowej potwierdzającej wykonanie zadania telemanipulatora jest decydującym ograniczeniem w każdej procedurze chirurgicznej a lepsza jakość obrazu zwiększa skuteczność podejmowanych decyzji (ruchów, czynności, zadań). Przeniesienie na odległość najlepszych kompetencji lekarza oraz możliwość wspomagania operacji za pomocą sztucznej inteligencji podnosi standardy w chirurgii. Opracowywana technologia ma równie duży wpływ na jakość i dostęp do usług diagnostycznych i rehabilitacyjnych [2].

Chirurgia serca jest ciągle wyzwaniem dla robotyki. To się zmieni jeśli wprowadzimy takie innowacje jak modułowość konstrukcji, efektywne sprzężenie siłowe czy mechatroniczne narzędzia.

W 2019 r. FRK sprzedała licencje oraz know how dotyczące robota toru wizyjnego Robin Heart PVA. Oczekujemy na wdrożenie pierwszego polskiego robota medycznego przez koszalińską firmę Meden Inmed.

Mamy nadzieję, że roboty medyczne Robin Heart w niedalekiej przyszłości będą z powodzeniem użytkowane klinicznie podnosząc precyzję operowania i przenosząc działania chirurga na odległość.

## ■ PODZIĘKOWANIA

Autorzy składają podziękowania swoim współpracownikom i wszystkim, którzy w jakikolwiek sposób wsparli projekt. Projekt Robin Heart był finansowany przez Fundację Rozwoju Kardiologii, sponsorów i wykonywany w ramach grantów krajowych: KBN 8 T11E 001 18, PW-004/ITE/02/2004, R1303301, R13 0058 06/2009, NCBR: R1303301 and R13 0058 06/2009, Robin PVA – nr 178576, TeleRobin – nr181019, LIDER /32/0175/L-8/16/NCBR/2017, oraz europejskich STIFF-FLOP FP7 European project

FP7/ICT-2011-7-287728, ENIAC “INCITE” project No.621278. Do tej pory suma środków uzyskanych z projektów nie przekroczyła jednej inwestycji – zakupu pierwszego w Polsce robota zakupionego dla ośrodka wrocławskiego. Robin Heart Team jest autorem wszystkich rozwiązań pokazanych w publikacji. Szczególne podziękowania kieruję dla Krzysztofa Lisa, Krzysztofa Lehricha, Łukasza Muchy, Kamila Rohra oraz Leszka Podsekowskiego, Krzysztofa Mianowskiego, Pawła Kostki, Marka Ciembroniewicza, którzy odegrali kluczową rolę w różnych okresach rozwoju projektu. Dziękujemy członkowi naszego zespołu, Mariuszowi Jakubowskiemu, który wykonuje dokumentację fotograficzną projektu.

## ■ BIBLIOGRAFIA

- [1] Nawrat Z.: Robot chirurgiczny – projekty, prototypy, badania, perspektywy, Rozprawa habilitacyjna, Katowice 2011
- [2] Nawrat Z.: Roboty Medyczne w systemach teleinformatycznych. Inżynieria Biomedyczna Podstawy i Zastosowania red: W.Torbicz, R.Maniewski, A.Liebert. Tom 7 Informatyka w medycynie. Red tomu. M.Kurzyński, L.Bobrowski, A.Nowakowski, J.Rumiński, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2019, Str 727-760
- [3] Nawrat Z., Mucha Ł., Lis K., Lehrich K., Rohr K., Kostka P.: Robot chirurgiczny Robin Heart Tele – następcą RobinHeart mc2. Medical Robotics Reports, 5/2016, s.29-35
- [4] Mucha Ł., Rohr, K. Lis K., Lehrich K., Kostka P., Sadowski W., Krawczyk D., Kroczyk P., Malota Z., Nawrat Z.: Postępy budowy specjalnych interfejsów operatora robota chirurgicznego Robin Heart. Medical Robotics Reports 4/2015, s.49- 55
- [5] Mahrabian A., Silent Messages, Wadsworth Pub. Co., 1971.
- [6] Potter M., Detecting meaning in RSVP at 13 ms per picture [W:], Attention, Perception and Psychophysics, 2014, 76(2):270-9.
- [7] Rynkiewicz T.: Struktura zdolności motorycznych oraz jej globalne i lokalne przejawy. AWF w Poznaniu. Poznań 2003, www.wbc.poznan.pl/content/2704/tr.html
- [8] Nawrat Z., Mucha Ł., Rohr K., Lis K., Lehrich K., Krawczyk D., Földesy P., Radó J., Dúcsó C., Santha H., Szabényi G., Fűrjes P.: Robin Heart INCITE – wprowadzenie sprzężenia siłowego dla telemanipulatora chirurgicznego. Medical Robotics Reports 5/2016, s. 36-44
- [9] Krawczyk D., Mucha Ł., Lis K., Z.Nawrat: Sterowanie robotem chirurgicznym z siłowym sprzężeniem zwrotnym – wstępne testy funkcjonalne robota Robin Heart, Medical Robotics Reports 07, 43-50,2019.
- [10] Krawczyk D., Mucha Ł., Fraś J.: Integracja zadajnika ruchu Robin Hand z jednoramiennym robotem chirurgicznym Robin Heart PVA wyposażonym w mechatroniczne narzędzie laparoskopowe Robin INCITE. Wydawnictwo Naukowe TYGIEL

## KOMENTARZ RECENZENTA...

**Jacek Cieślak, dr hab. inż., prof. AGH**

W artykule przedstawiono najważniejsze osiągnięcia zespołu badawczego z złożonego z pracowników FRK w Zabrze, instytucji naukowych i klinik pracującego nad projektami polskiego robota kardiologicznego Robin Heart. Przedstawiono i omówiono dotychczasowe wyniki prac nad kolejnymi prototypami, ze szczególnym uwzględnieniem unikalnych rozwiązań konstrukcyjnych i technologicznych. Podsumowania i piśmiennictwo zawiera szczegółowe obszerne odniesienie do źródeł literaturowych w tym projektów i grantów badawczych.

**Paweł Kostka, dr hab. inż. prof. PŚI**

Artykuł w swej formie unikatowy, prezentuje we wstępie kompleksowy przegląd rozwoju robotyki medycznej, na przykładzie projektu kolejnych ramion i systemów zadajników spiętych układem sterowania, rodziny RobinHeart, połączony z analizą korzyści i deficytów prezentowanych rozwiązań na kolejnych etapach, by w zasadniczej części skupić się na przedstawieniu innowacyjnego toru sprzężenia siłowego, z oryginalnym, opracowanym w międzynarodowym zespole projektu INCITE, miniaturowym sensorem siły, bazującym na czujniku typu MEMS, umieszczonym w szczękach narzędzia chirurgicznego (kleszcze) oraz typu Force/Torque do detekcji momentów sił zewnętrznych działających na całe narzędzie laparoskopowe jako sensory generujące sygnały wejściowe do wielokanałowego toru akwizycji i przetwarzania danych wraz z regulatorem oraz narzędziem wykonawczym – zadajnikiem haptycznym operatora.

Artykuł prezentuje zaawansowane wyniki prac popartem testami w warunkach laboratoryjnych, zbliżonych do rzeczywistych, w bardzo istotnym aktualnie dla rozwoju robotyki nie tylko medycznej obszaru ergonomicznego i jednocześnie funkcjonalnego interfejsu człowiek-maszyna (MMI Man-Machine Interface), w układzie sterowania bilateralnego telemanipulatorem, z pętlą siłowego sprzężenia zwrotnego. Zaprezentowane rozwiązania mogą okazać się użyteczne dla wielu obszarów aplikacyjnych MMI, co istotne aktualnie, w tak dynamicznie rozwijającym się globalnie systemie Internetu Rzeczy (IoT), gdzie każde urządzenie wyposażone w terminal we/wy, staje się aktywnym węzłem w komunikacji pionowej i poziomej o zasięgu globalnym.