

Postępy budowy specjalnych interfejsów operatora robota chirurgicznego Robin Heart

Artykuł recenzowany

Streszczenie

Praca stanowi przegląd oryginalnych systemów zadawania ruchu opracowanych dla polskiego robota chirurgicznego Robin Heart. Najnowsze, oryginalne rozwiązanie kontroli robota chirurgicznego Robi Heart – haptyczny zadajnik ruchu – pozwala na sprawne i z wyczuciem siły 3D sterowanie narzędziami robota.

Słowa kluczowe:

sterowanie telemanipulatorów, zadajniki ruchu, systemy haptyczne, haptic device, manipulator chirurgiczny, RobinHend, sterowanie robotem, FRK, Robin Heart

ŁUKASZ MUCHA¹,
KAMIL ROHR¹,
KRZYSZTOF LIS²,
KRZYSZTOF
LEHRICH²,
PAWEŁ KOSTKA²,
WOJCIECH
SADOWSKI¹,
DARIUSZ
KRAWCZYK¹,
PIOTR KROCZEK¹,
ZBIGNIEW
MAŁOTA¹
I ZBIGNIEW
NAWRAT^{1,3}

¹Fundacja Rozwoju
Kardiochirurgii
im. prof. Zbigniewa Religi,
Zabrze

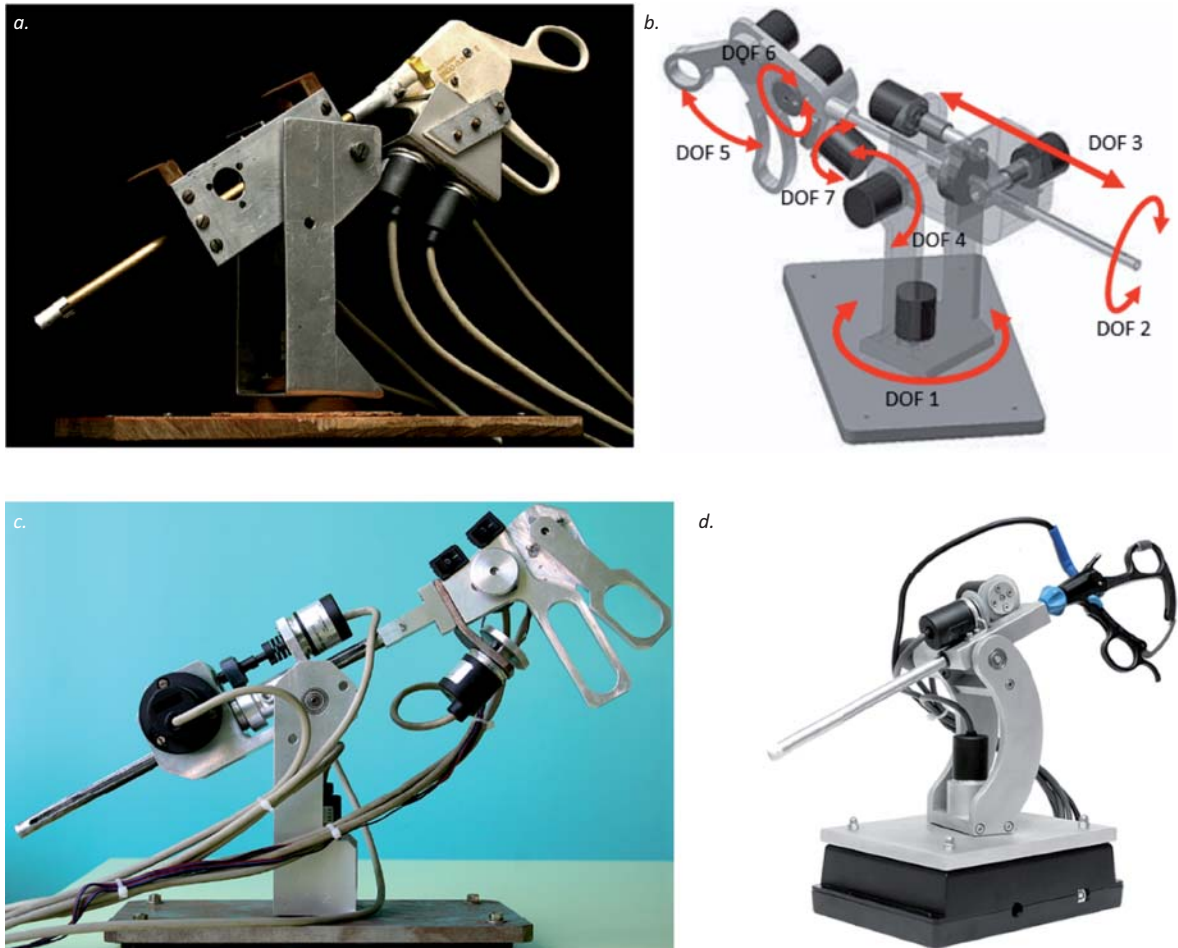
²Politechnika Śląska,
Gliwice

³Śląski Uniwersytet
Medyczny w Katowicach

WPROWADZENIE

Rodzina manipulatorów Robin Heart powstała w Fundacji Rozwoju Kardiochirurgii im. prof. Zbigniewa Religi (FRK) w Zabrze we współpracy ze specjalistami kilku ośrodków akademickich i przedsiębiorstw. Projekt rozpoczął się w roku 2000. Robot ma strukturę modułową umożliwiającą zestawienie sprzętu dla różnych typów operacji na tkankach miękkich. W szczególności samodzielny człon stanowi ramię endoskopowego toru wizyjnego o szerokim zasięgu stosowania. Projekt ewoluował wraz z rosnącym doświadczeniem zespołu [1].

Robot kardiochirurgiczny jest manipulatorem kopiującym, telemanipulatorem. Zadajnik ruchu Robina stanowi odrębny układ elektromechaniczny, przekształcający intuicyjny ruch dłoni na ciąg impulsów cyfrowych, które umożliwiają operatorowi manipulację narzędziami robota. Najprostszy system sterowania można zastosować, gdy kinematyka zadajnika ruchu i kinematyka robota są podobne; wtedy ruch zadajnika jednoznacznie odpowiada ruchowi robota. Optymalna kinematyka manipulatora (*slave*) zwykle różni się od zadajnika ruchu (*master*). Wymaga to obliczeń układu sterowania



Rys. 1. Zadajniki ruchu oparte o budowę klasycznego narzędzia laparoskopowego: a) prototyp 5 DOF b) model CAD, c) zadajnik 7 DOF, d) model komercyjny

opartych na modelach prostym i odwrotnym robota narzędziowego i zadajnika ruchu. System może zostać wyposażony 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. Zarówno sygnały niosące informację o czynnościach operatora, jak i sygnały zwrotne mogą podlegać skalowaniu [1].

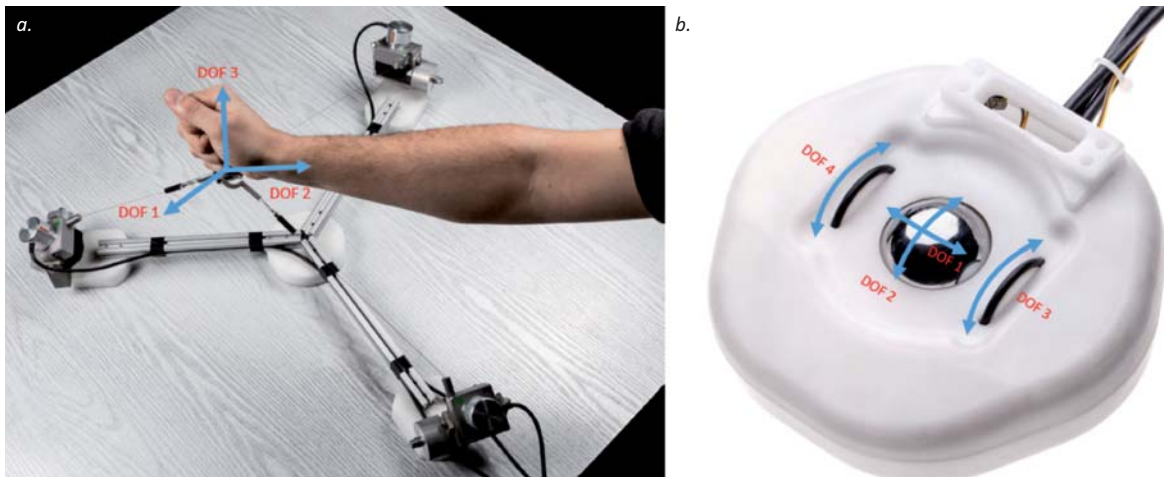
W obecnie stosowanych robotach chirurgicznych brak jest efektywnego sprzężenia siłowego. Chirurg polega na informacjach wizualnych aby bezpiecznie wchodzić w interakcje z tkankami ciała. W celu eliminacji niedogodności wynikających z tego typu sterowania opracowywane są haptyczne (gr. *háptein* – przyczepiać, chwytać) zadajniki ruchu, które umożliwiają sterowanie robotem dając operatorowi jednocześnie subiektywne odczucie kontaktu z ciałem pacjenta.

Telemanipulator chirurgiczny musi spełniać nie tylko ściśle wymagania 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. Projektowanie miejsca pracy operatora robota chirurgicznego wymaga studiów cech szczególnych pracy chirurga; doświadczenia, psychologii, ergonomii oraz obiektu pracy; anatomii, fizjologii, biofizyki tkanek i samego robota (struktura kinematyczna, cechy systemu sterowania robotem).

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 ograniczanie liczby stopni swobody (ruchliwości stawów) traci się naturalną zdolność (zręczność) wykonywania różnych zadań [1].

We wstępnej fazie projektu robota Robin Heart badano oddziaływania narzędzi na tkanki ale też



Rys. 2. Zadajniki: a) 3 CORD, b) BALL 4D

proawdzono studia pracy za pomocą różnych narzędzi wykonawczych dla zrozumienia specyfiki doświadczenia chirurga. Zaprojektowano i przebadano wiele różnych modeli – zarówno z więzami mechanicznymi jak i bezdotykowe [2-5].

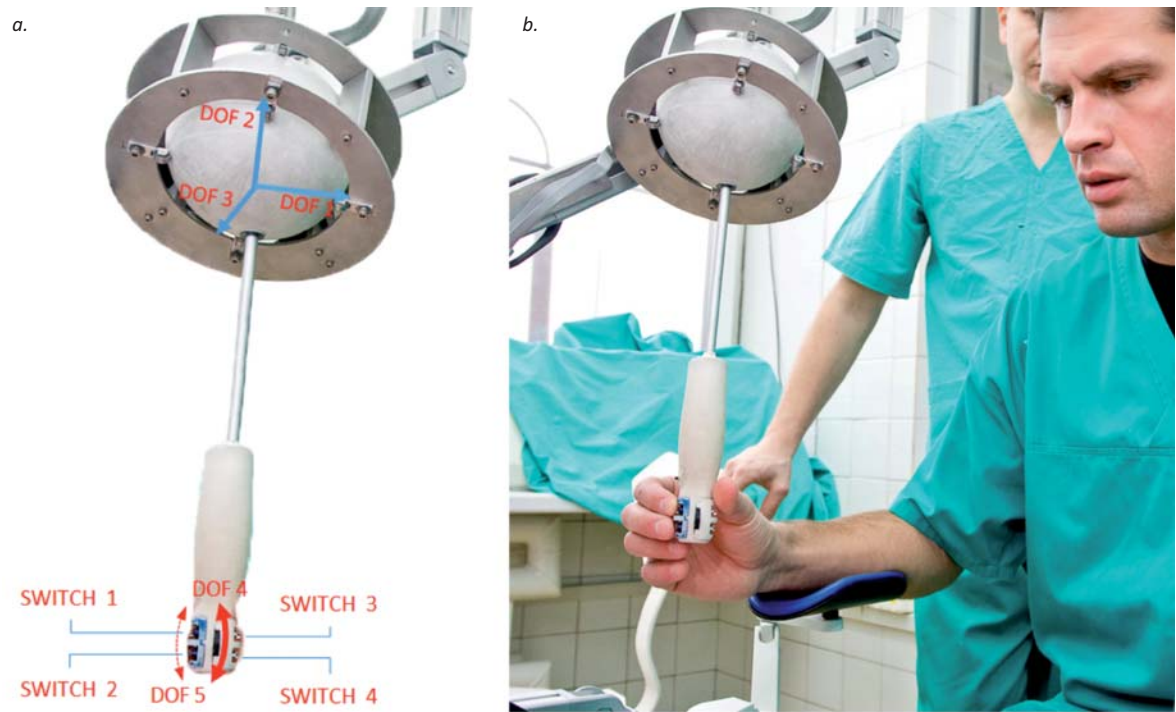
INTERFEJS UŻYTKOWNIKA ROBOTA ROBIN HEART

W ramach realizowanych prac badawczych związanych z budową polskiej rodziny robotów Robin Heart rozpoczętych w 2000 r. w Fundacji Rozwoju Kardiochirurgii rozpoczęto prace nad opracowaniem własnego systemu sterowania. Na przestrzeni lat konstrukcje (o różnej kinematyce) kolejnych modeli robota jak i rosnące doświadczenie zespołu projektowego przyczyniły się do powstania zróżnicowanych modeli zadajników ruchu. W pierwszym etapie opracowane prototypy oparte były o budowę i kinematykę pracy klasycznego instrumentu laparoskopowego posiadającego 5 stopni swobody. Powodem była potrzeba dostosowania sposobu sterowania robota dla przyszłego użytkownika: specjalisty w chirurgii endoskopowej. Zadajniki te przeznaczone były do sterowania robotem oraz treningu i planowania zabiegów w wirtualnej sali operacyjnej. Konieczność zwiększenia przestrzeni manipulacyjnej wewnątrz ciała pacjenta spowodowała rozwój narzędzi robotów chirurgicznych poprzez dodanie kolejnych sterowalnych par przegubowych w efektorze narzędzia. Kolejna wersja została rozbudowana o dwa stopnie swobody (6 i 7 DOF) – Rys. 1.

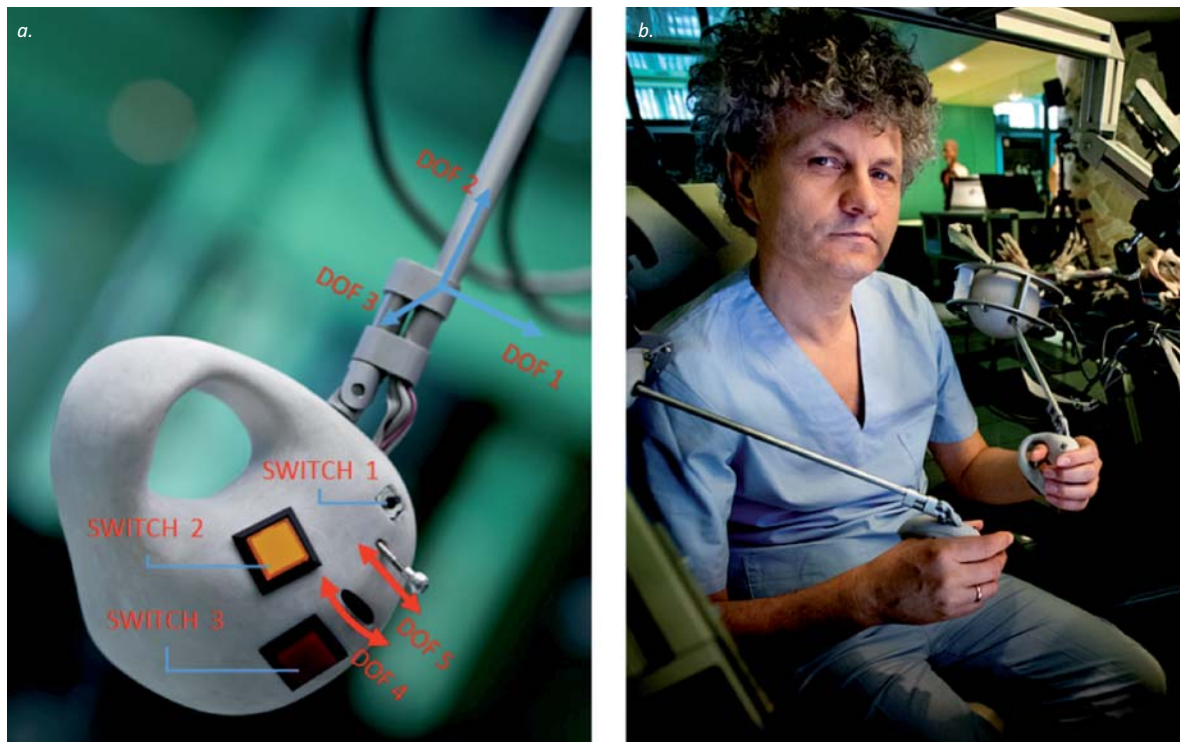
Kolejny z przedstawionych zadajników ruchu – zadajnik 3 CORD – jest zbudowany w oparciu na cięgnach – umożliwia sterowanie położeniem robota w trzech osiach. Zadajnik ten został zaprojektowany do sterowania położeniem endoskopowego toru

wizyjnego, przy czym sterowanie obrotem kamery wokół własnej osi odbywało się za pomocą przycisków nożnych. Następnym rozwiązaniem tego typu jest zadajnik BALL 4D, który umożliwia manipulację wszystkimi czterema osiami wymaganymi dla toru wizyjnego bezpośrednio z zadajnika. Manipulacja w płaszczyźnie XY odbywała się za pomocą kuli, którą obracał operator, obrót i wysuw kamery w osi Z realizowany był poprzez rolki trzeciego i czwartego stopnia swobody. Zaletą takiego rozwiązania było znaczne zmniejszenie przestrzeni zajmowanej przez zadajnik, jego wadę stanowiło kłopotliwe sterowanie dla realizacji toru krzywoliniowego. Zadajniki wraz z zaznaczonymi kierunkami manipulacji zostały przedstawione na rysunku 2.

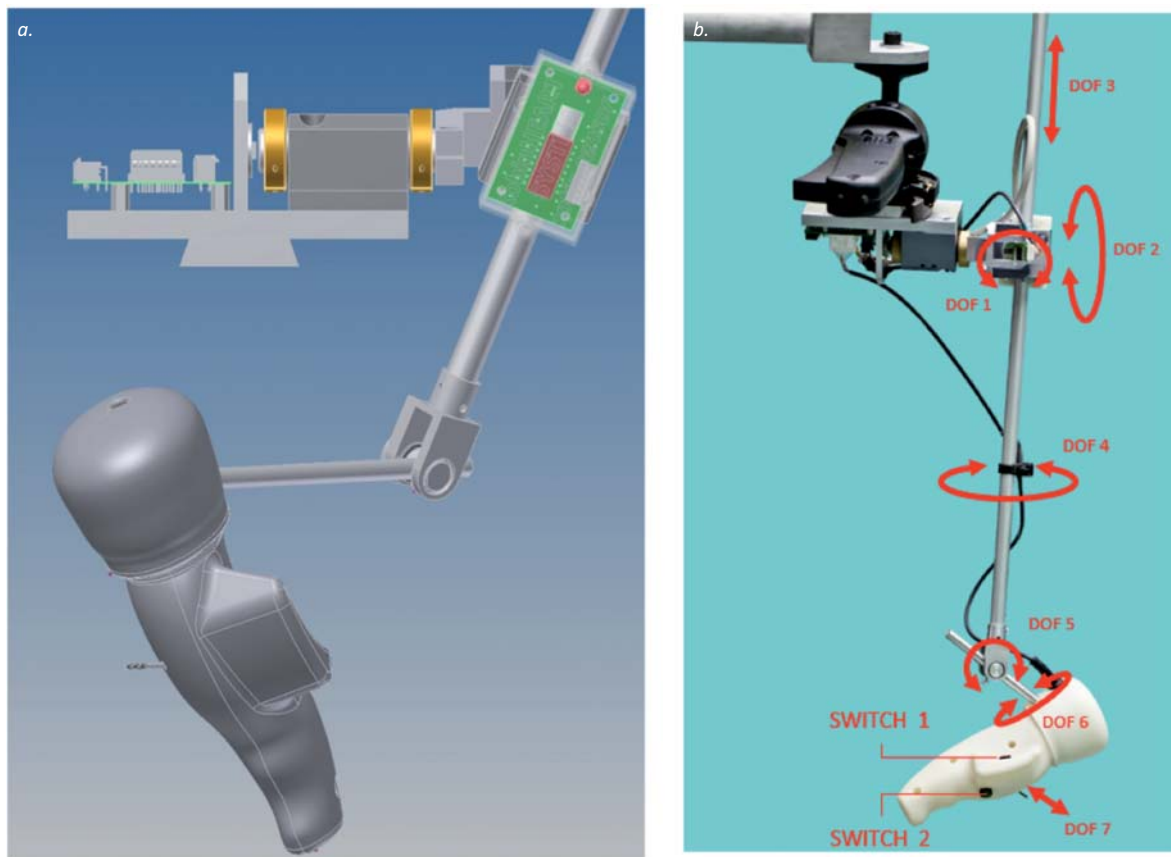
W efekcie kolejnych lat pracy zespołu powstał zadajnik *Stic* którego budowa trzech pierwszych DOF'ów została oparta na sferze, natomiast efektor stanowił część chwytową z czterema programowalnymi przyciskami oraz dwoma przesuwami leżącymi po przeciwnych stronach urządzenia DOF 4 oraz DOF 5 (rys. 3). Dzięki dodatkowym przyciskom operator mógł sterować jednym zadajnikiem położeniem narzędzia, natężeniem światła, oraz funkcjami kamery laparoskopowej. Dalszą rozwojową wersją tego urządzenia stał się zadajnik *Stic II* z efektorzem dopasowanym do dłoni operatora, kule natomiast zostały odsunięte za plecy osoby sterującej (rys. 4). Obydwa zadajniki zostały wykorzystane w eksperymencie na zwierzętach z użyciem robota chirurgicznego Robin Heart w latach 2009-2010. Ze względu na duże tarcia w kuli (DOF 1-3) została ona zastąpiona przemieszczeniem liniowym oraz dwoma obrotami tworzącymi przegub krzyżowy. W efekcie dalszych prac rozwojowych wykonany został prototyp zadajnika *ErgoMove*.



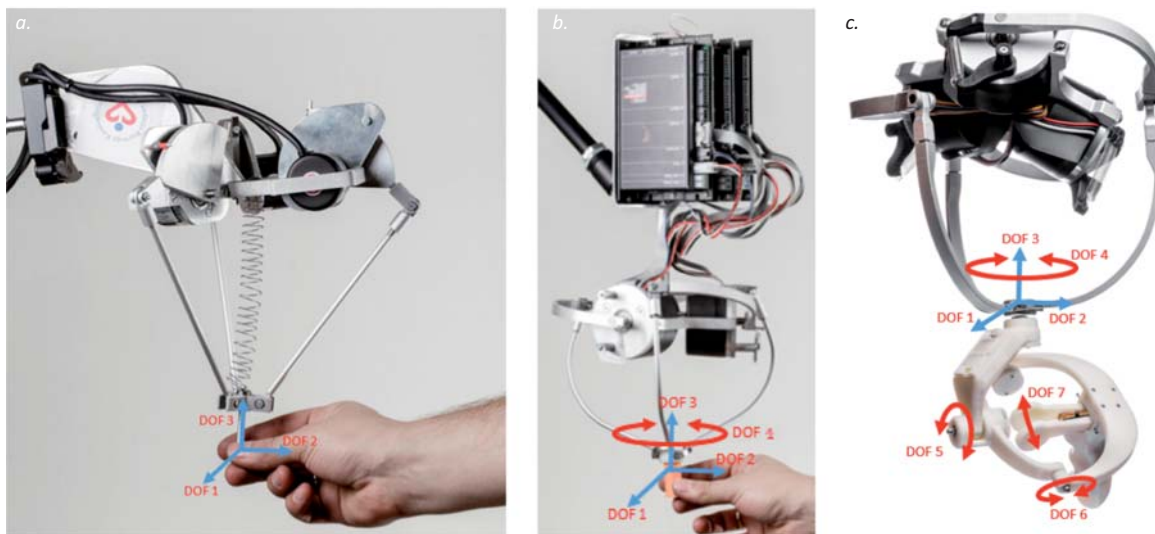
Rys. 3. Zadajnik Stic: a) kierunki manipulacji, b) metoda manipulacji



Rys. 4. Zadajnik Stic II: a) kierunki manipulacji, b) dr hab. Zbigniew Nawrat sterujący robotem Robin Heart



Rys. 5. Zadajnik ErgoMove: a) model CAD, b) model rzeczywisty



Rys. 6. Zadajnik RobinHand wersja: a) RobinHend H, b) RobinHend F, c) RobinHend L



Rys. 7. Zadajnik RobinHand L a) wersja mobilna – komunikacja WiFi, b) konsola sterująca wraz z zaadaptowanym zadajnikiem (projekt Stiff Flop)



Rys. 8. Prototypy miniaturowych zadajników dedykowanych dla robotów toru wizyjnego: robot Pelikan z zaznaczonymi stopniami swobody (a), zadajnik – wersja urządzenia w oparciu o czujniki żyroskopowe (b), z zastosowaniem manipulatora punktowego (trackpoint) (c), oraz czujnika siły 3D wykonanego w technologii MEM's (projekt INCITE) wykorzystywanego jako mikrodzwojstka (d-f)

W zadajniku tym manipulacja w zakresie sześciu stopni swobody odbywa się poprzez obroty poszczególnych członów względem siebie, otwarcie i zamknięcie szczęk narzędzia realizowane jest poprzez siódmy stopień swobody. Zadajnik wyposażony jest dodatkowo w dwa programowalne przyciski (rys. 5).

W roku 2015 opracowany został przez grupę dr Krzysztofa Lisa zadajnik *RobinHand H* o trzech stopniach swobody, przeznaczony do sterowania robotem toru wizyjnego (Rys. 6). W następnej wersji *RobinHand F* wyposażony został w napędy umożliwiające realizację siłowego sprzężenia zwrotnego (DOF 1-3), a także dodatkowy obrotowy stopień swobody (DOF 4). Jego najnowsza wersja *RobinHand L* przystosowana została do adaptacji na potrzeby projektu *Stiff-flop* z możliwością realizacji 7 stopni swobody przy czym na pierwszych trzech realizowane jest siłowe sprzężenie zwrotne. Poprawiona została ergonomia części chwytowej dopasowana do dłoni operatora. Zadajnik ten dostępny jest w dwóch wersjach: mobilnej-mocowanej na przegubowym ramieniu (Rys. 7a), oraz w wersji z konsolą sterującą (Rys. 7b).

W ostatnim czasie wykonane zostały prototypy miniaturowych zadajników dedykowanych dla robotów toru wizyjnego. Prototypy te przeznaczone są do mocowania bezpośrednio na klasycznym narzędziu laparoskopowym. W ramach prac badawczych wykonano kilka wersji urządzeń w oparciu o czujniki żyroskopowe (Rys. 8a), z zastosowaniem manipulatora punktowego (*trackpoint*) (Rys. 8b), oraz czujnika siły 3D wykonanego w technologii MEM's wykorzystywanego jako mikrodźwójstka (Rys. 8c).

WNIOSKI

Pracownia Biocybernetyki Instytutu Protez Serca Fundacji Rozwoju Kardiologii prowadzi projekt robota chirurgicznego Robin Heart. Zaprojektowano, wykonano, badano kilkanaście różnych modeli robota. Optymalizowane są rozwiązania konstrukcyjne i sterowanie, w tym ergonomiczna konsola i zadajniki ruchu. W tym zakresie największymi sukcesami polskiego zespołu są:

1. konsola Robin Heart Shell 1 – system kontroli robota zunifikowany dla konsoli oraz narzędzi typu Robin Heart Uni System – narzędzia można zdjąć z ramienia robota i operować nimi ręcznie; zwerfifikowana w pierwszych eksperymentach na zwierzętach w 2009 roku,

2. konsola Robin Heart Shell 2 wykorzystana do sterowania robota Robin Heart mc² podczas eksperymentów na zwierzętach w 2010 r. Robot pracował „za trzech chirurgów” – głównego i dwóch asystujących, dzięki układowi zadajników ruchu i sprzęgieł mógł być sterowany przez jednego operatora,
3. konsola Robin Stiff Flop – z w pełni haptycznym zadajnikiem ruchu.

Obecnie trwają kolejne testy haptycznego systemu RobinHand. Do tej pory wszystkie wyniki świadczą, że może spełnić on oczekiwania odbiorców. Mamy nadzieję, że zebrane wiedza i doświadczenia pozwolą na wykonanie komfortowego miejsca pracy chirurga zdalnie operującego w sposób bezpieczny i precyzyjny. Czas na wdrożenie oczekiwanego i akceptowanego przez użytkowników – chirurgów – polskiego systemu robotów rodziny Robin Heart.

PODZIĘKOWANIA

Projekt robota Robin Heart był finansowany w ramach projektu KBN 8 T11E 001 18, PW-004/ITE/02/2004, grant nr R1303301 i R13 0058 06/2009, projektów NCBiR Robin PVA – nr 178576, TeleRobin – nr 181019 oraz przez Fundację Rozwoju Kardiologii i wielu sponsorów. The project supported in part by the European Commission within the STIFF-FLOP FP7 European project FP7/ICT-2011-7-287728 and STIFF-FLOP FP7 European project FP7/ICT-2011-7-287728.

Dziękujemy za pomoc w przygotowaniu doskonałych fotografii Panu **Mariuszowi Jakubowskiemu** z Pracowni Biocybernetyki IPS FRK.

LITERATURA

- [1] Z. Nawrat, Robot chirurgiczny Robin Heart – projekty, prototypy, badania, perspektywy. Rozprawa habilitacyjna 24/2011. Śląski Uniwersytet Medyczny w Katowicach, Katowice 2011.
- [2] Z. Nawrat, P. Kostka, K. Lis, K. Rohr, Ł. Mucha, K. Lehrich, W. Sadowski, Z. Małota; „Interfejs operatora robota chirurgicznego – oryginalne rozwiązania sprzężenia informacyjnego i decyzyjnego”. *Medical Robotics Reports*, volume 2, Grudzień 2013, s.12-21
- [3] P. Kostka, A. Nawrat, Ł. Antoniuk, W. Sadowski, Z. Małota. Innowacyjne zastosowania bezkontaktowych interfejsów użytkownika w rozpoznawaniu gestów i telemanipulacji. *Medical Robotics Reports*, volume 2, Grudzień 2013, s.39-45
- [4] S. M. Mustaza, D. Mahdi, C. Saaj, W. A. Albukhanajer, C. Lekakou, Y. Elsayed, J. Fras; Tuneable Stiffness Design of Soft Continuum Manipulator; *Intelligent Robotics and Applications Volume 9246 of the series Lecture Notes in Computer Science*; Sierpień 2015; s.152-163
- [5] K. Lehrich, K. Lis, Z. Nawrat, Ł. Mucha, K. Rohr; The application of 3D printing to the construction of medical manipulators prototypes; *Mechanik 3/2016* ISSN 0025-6552;