

Robin Heart INCITE

– wprowadzenie sprzężenia siłowego dla telemanipulatora chirurgicznego

Robin Heart INCITE – application of Haptic Feedback to Surgical Telemanipulator

Artykuł recenzowany

ZBIGNIEW
NAWRAT^{1*},
ŁUKASZ MUCHA¹,
KAMIL ROHR¹,
KRZYSZTOF LIS²,
KRZYSZTOF
LEHRICH²,
DARIUSZ
KRAWCZYK¹,
PÉTER FÖLDESZ³,
JÁNOS RADÓ^{3,4},
CSABA DÜCSŐ³,
HUNOR SÁNTHA⁵,
GÁBOR SZEBÉNYI⁵,
PÉTER FÜRJES³

¹ Fundacja Rozwoju
Kardiologii – FRK,
Pracownia Biocybernetyki,
Zabrze, Polska

² Politechnika Śląska,
Mechaniczny Technologiczny,
Katedra Budowy Maszyn,
Gliwice, Polska

³ Centre for Energy Research,
Inst. of Technical Physics and
Materials Science – EK MFA,
Budapest, Hungary

⁴ Óbuda University,
Budapest, Hungary

⁵ Budapest Univ. of Technology
and Economics - BME,
Budapest, Hungary

*e-mail: nawrat@frk.pl

Streszczenie

Celem pracy jest przedstawienie rozwoju projektu systemu sterowania robota Robin Heart z zastosowaniem specjalnych mikro-czujników 3D MEMS, dla weryfikacji ich następujących funkcji: 1) sterowanie robotem toru endoskopowego za pomocą mikro-dźwostka zintegrowanego z rękojeścią narzędzia laparoskopowego dla ergonomicznej manipulacji. 2) pomiar wartości i kierunku działania siły pomiędzy szczęką narzędzia laparoskopowego, a organem. 3) diagnostyki tkanek podczas pracy za pomocą czujnika dotykowego 3D umieszczonego w czołowej części narzędzia. Piezorezystancyjne sensory krzemowe zostały zaprojektowane i wykonane przez węgierską firmę EK MFA. Przeprowadzone zostały symulacje MES w celu określenia podstawowych parametrów mechanicznych czujnika. Czujniki zostały pokryte polimerem półprzewodnikowym PDMS (polidimetylosiloksan), następnie przeprowadzono badania wpływu powłoki elastycznej pod kątem czułości i czasu odpowiedzi.

Zgodnie z wymaganiami medycznymi i funkcjonalnymi czujniki dodatkowo zostały pokryte biokompatybilnym elastycznym polimerem. Wykonany został prototyp miniaturowego zadajnika ruchu umieszczonego na części chwytowej narzędzia laparoskopowego. Przeprowadzone zostały testy polegające na orientacji robota w polu operacyjnym za pomocą trójosiowego czujnika siły. Przeprowadzono wstępne testy sensorycznego narzędzia laparoskopowego zintegrowanego z robotem ROBIN HEART i zadajnikiem ruchu Robin Hand. Zrealizowane badania prototypowych czujników wykazały ich użyteczność w układzie siłowego sprzężenia zwrotnego robota. Potwierdzono celowość aplikacji do oceny stanu tkanki i siły zacisku graspera laparoskopowego. Praca została wykonana w ramach projektu EU INCITE finansowana częściowo przez NCBiR.

Abstract

The aim of this work is to demonstrate the applicability and functionality of the Robin Heart robot's control systems integrated with special MEMS based 3D force micro-sensors. Three different robot functions and corresponding detector devices are proposed: 1) Micro-joystick type actuator to be integrated in the hilt of the laparoscope to control easily robotic movement during operation. 2) 1D force sensor located inside the laparoscopic jaw to provide feedback to the surgeon by measuring the grasping strength and 3) 3D (vectorial) force/tactile sensor placed at the tip of the laparoscope which facilitates palpation for tissue diagnostics during operation. The silicon based piezoresistive sensors have been designed and prepared by micromachining technologies in the MEMS Laboratory of EK MFA (Budapest, Hungary). According to the medical and functional requirements the sensors were electro-mechanically integrated and covered by biocompatible elastic polymer (polydimethylsiloxane – PDMS) by BME (Budapest, Hungary). The device geometry was modelled by coupled finite element simulation to determine its expected performance. The effect of the elastic coverage was studied in terms of sensitivity and response time also. Preliminary test of the laparoscopic head equipped with MEMS sensors and integrated in the ROBIN HEART surgery robot system was performed by FRK (Zabrze, Poland). A model of the robot controller using a prototype of 3D force sensor has been also successfully tested during the tests of the functional robot. Studies of the prototypes of “smart” sensory laparoscopes have demonstrated their remarkable usefulness in force feedback robotic systems to recognize the state of tissue and to determine the clamping force of the grasper of surgical system. The international cooperation to develop “smart” laparoscope for robotic surgery was done in the frame of the ENIAC “INCITE” project No.621278 and partially financed by the ENIAC JU and the National Centre for Research and Development (NCBR - Poland) and National Research, Development and Innovation Fund (NKFIA – Hungary).

Keywords:

surgical robot, force sensor, tactile sensor, minimal invasive surgery (MIS), force feedback, haptic

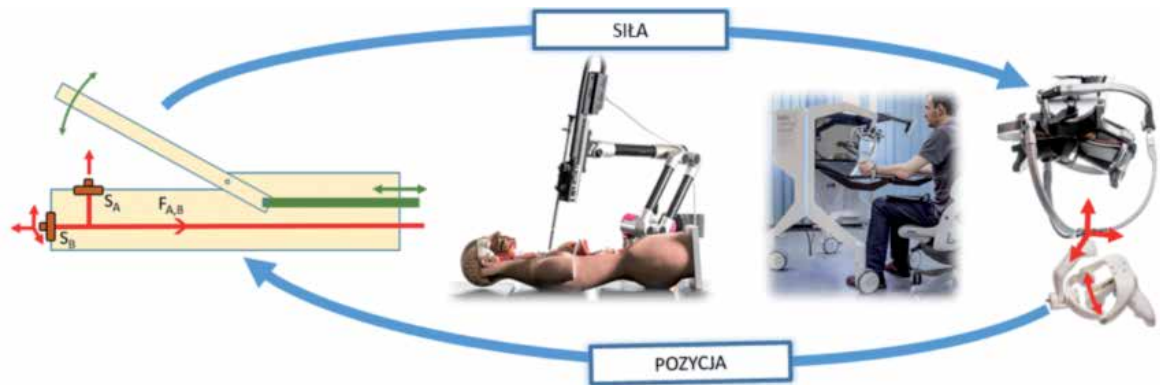
WSTĘP

Robotyka z definicji jest dyscypliną naukową poświęconą projektowaniu i zastosowaniu robotów [1]. Robot w odróżnieniu od automatu, to inteligentne połączenie percepcji (sensorów) z działaniem (pracą mechaniczną).

Robot chirurgiczny dzisiaj to telemanipulator. Podczas pracy takiego robota to lekarz decyduje o wykonywanych przez narzędzia czynnościach wewnątrz pacjenta – obecnie na podstawie informacji obrazowej. Zabieg wykonywany w ten sposób stawia duże wymagania dotyczące jakości obrazu z endoskopu

podczas tzw. wideooperacji [2]. Chirurg, operator robota, zadaje zadania ruchowe i czynnościowe dla narzędzi robota za pomocą trzymany w dłoni specjalnych dżojstyków zwanych zadajnikami ruchu lub z ang. hapticami [3]. Od wielu lat trwają badania nad wprowadzeniem efektywnego sprzężenia siłowego dla chirurga – do tej pory bez powodzenia [2]. Idea sterowania realizującego siłowe sprzężenie zwrotne została przedstawiona na rysunku 1.

Bidard i wsp. dokonali przeglądu i opisu prac projektowych urządzenia wejściowego dla telechirurgii [4]. Dobry haptyczny zadajnik ruchu musi być



Rysunek 1. Schemat rozmieszczenia czujników w efektorze narzędzia, oraz idea siłowego sprzężenia zwrotnego [16]

transparentny. Operator musi się czuć jakby wykonywał zadania zdalnego sterowania bezpośrednio we właściwym środowisku, i swobodnie poruszając się w wolnej przestrzeni, wyczuwać kontakt z napotykanymi przeszkodami (odpowiedniego sprzężenia siłowego i dużej sztywności robota [5].

Może to być definicja intuicyjnego zadajnika ruchu. Są jeszcze zadajniki symboliczne, logiczne – np. typowe programowanie komputerowe robotów, w którym ruch odbywa się przez zadanie określone cyfrowo. W opozycji do przedstawianego podejścia do sterowania, w projekcie Robin Heart zespół badawczy wprowadził ideę sterowania, w którym operator intuicyjnie określa pozycję końcówki roboczej, a samo działanie (rozwijana koncepcja automatyzacji wykonywania zadań) uruchamiane jest za pomocą elektronicznych przycisków i mikrodozowników (z ustaloną logiką sterowania różnych narzędzi). Koncepcja ta pozwoliła na naturalne wprowadzenie systemu uniwersalnych narzędzi – o takiej samej funkcjonalności jak narzędzie robota, ale orientowanych manualnie [2].

Zadanie wykonania sensorycznego robota Robin Heart jest prowadzone w ramach europejskiego projektu INCITE (ang. *Intelligent Catheters in Advanced Systems for Interventions*). Opracowane narzędzie współpracujące z zadajnikiem ruchu realizującym siłowe sprzężenie zwrotne (ang. *Force Feedback*) pozwoli operatorowi na subiektywne czucie kontaktu instrumentu chirurgicznego z operowanymi tkankami. Wysoka precyzja i ergonomiczny system sterowania robotem odpowiada na współczesne wyzwania dotyczące innowacyjnych narzędzi chirurgicznych i robotów [6].

■ DYNAMIKA NARZĘDZI CHIRURGICZNYCH

W chirurgii, musi być zagwarantowany wysoki poziom bezpieczeństwa. Urządzenia wejściowe – zadajniki ruchu zwane, też interfejsem użytkownika – muszą być wyważone statycznie w celu zminima-

lizowania zmęczenia, a system sterowania powinien wykluczyć przypadkowe ruchy dłoni operatora. Co więcej, rozdzielczość siły sprzężenia zwrotnego powinna być adekwatna do wycucia przez chirurga kontaktu z tkanką i organami, aby właściwie ocenić poprawność ruchu i działania narzędzia. Pełne poczucie obecności wewnątrz pola operacji wymaga poczucia siły w szczękach trzymających tkankę czy igłę oraz oddziaływania siłowego między narzędziami, narzędziem i troakarem. Siły stosowane podczas zabiegów są różne od 0,3 N podczas pomostowania naczyń wieńcowych [7] do 4 N prostopadle i 50 N wzdłuż osi narzędzia podczas operacji pęcherzyka żółciowego [8]. W procedurach telechirurgicznych, amplituda siłowego sprzężenia powinna wynosić 10-20 N, obszar roboczy natomiast 200 x 200 x 200 mm. Urządzenie wejściowe powinno działać w zakresie typowych procedur operacji, tj. 0-15 N [9]. Podobne wyniki otrzymano podczas badań własnych [2]. W pracy *The must-have in robotic heart surgery: haptic feedback* wykazano, że brak sprzężenia siłowego związany jest ze stosowaniem wyższej siły do wiązania supełków 1,32 N w przypadku braku sprzężenia, 1,14 dla sprzężenia siłowego 1:1, oraz 1,02 dla sprzężenia 2:1 [10]. Oznacza to, że sprzężenie siłowe może zapobiegać niewłaściwemu wykonaniu niektórych elementów zabiegu.

Niestety do dzisiaj problem sprzężenia siłowego nie został praktycznie rozwiązany. Powszechnie stosowany amerykański robot da Vinci (około 600 tys. operacji rocznie) pozwala jedynie na oszacowanie sił zamknięcia szczęk. Siła zewnętrzna działająca na narzędzie odczuwana jest po przekroczeniu wartości 2 N. Nie pozwala to na aktywną kontrolę oddziaływania przy szyciu naczyń bądź ocenę stanu operowanego narządu, ponieważ siły te są na poziomie 0,2-1 N [11].

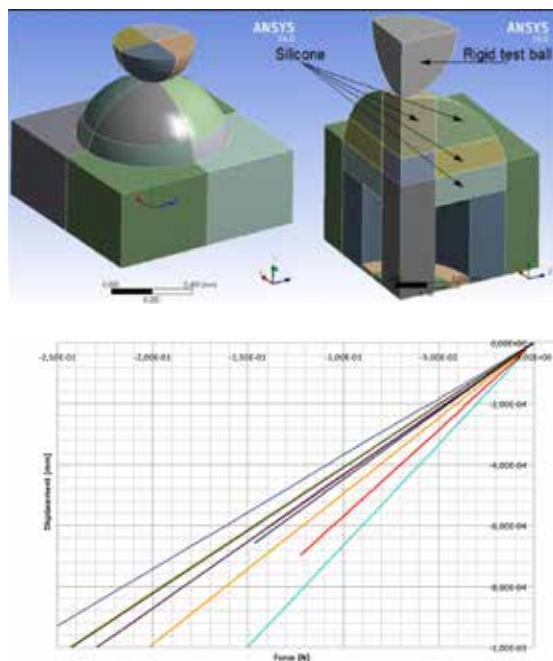
W przypadku zrobotyzowanych narzędzi trudność tkwi głównie w braku dokładnych, małych czujników siły, które mogłyby być elementami pomiarowymi

w końcówce narzędziowej. Zespół badawczy FRK pracuje nad rozwiązaniem dwóch najważniejszych problemów chirurgii z wykorzystaniem robotów: palpacji oraz siłowego sprzężenia z pomiarem w szczękach narzędzia. Pierwsze pozwala na precyzyjną ocenę miejsca akcji chirurgicznej i rozpoznanie stanu patologicznego tkanek (otoczenia), drugie umożliwia precyzyjne operowanie (bezpieczne, precyzyjne chwytanie tkanek, wiązanie węzłów nici chirurgicznych, itp.) [2].

■ CZUJNIK SIŁY 3D

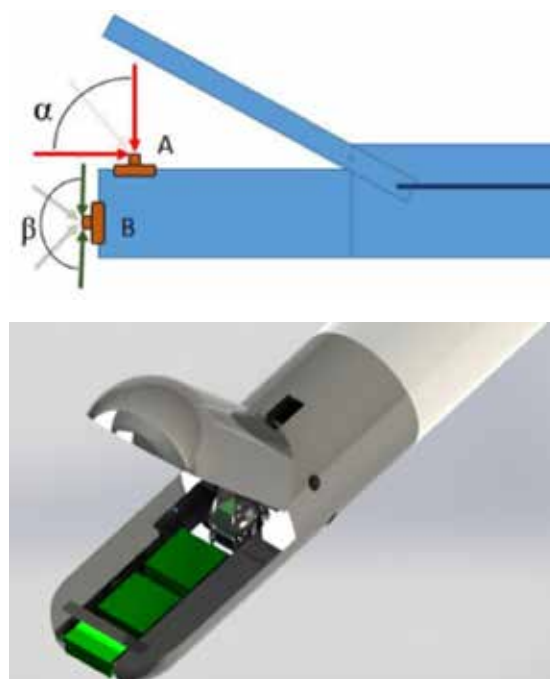
Węgierscy partnerzy projektu INCITE (EK MFA, 3D Silicon) pod kierunkiem Petera Fürjes zaprojektowali i wykonali specjalizowane czujniki do montażu bezpośrednio w części wykonawczej (efektorze) narzędzia chirurgicznego – przeznaczone do realizacji siłowego sprzężenia zwrotnego. Drugim typem opracowanych czujników były sensory mocowane bezpośrednio w części chwytowej narzędzia laparoskopowego, dedykowane dla systemu sterowania – służące jako minidżojstik przeznaczony do kontroli pozycji robota. Czujniki wykonane zostały w technologii MEMS bazując na czterociałowych waflach krzemowych i borokrzemianowych [12].

Aby wyznaczyć dokładne parametry geometryczne (grubości membrany, wymiarów bocznych) oraz czułości wbudowanych piezo-rezystorów zastosowano metodę elementów skończonych (MES), gdzie szczegółowo przeanalizowano parametry (Rys. 2).

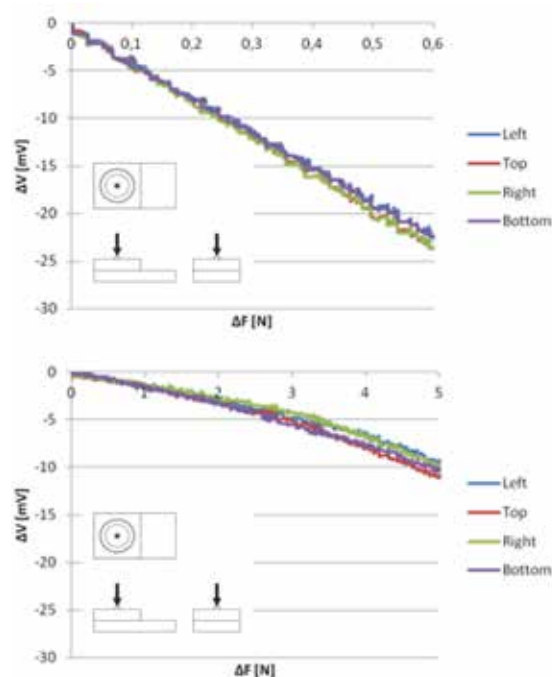


Rysunek 2. Widok modelu czujnika w środowisku Ansys (na górze) oraz wykres siła-odkształcenie dla różnych wartości sztywności silikonu

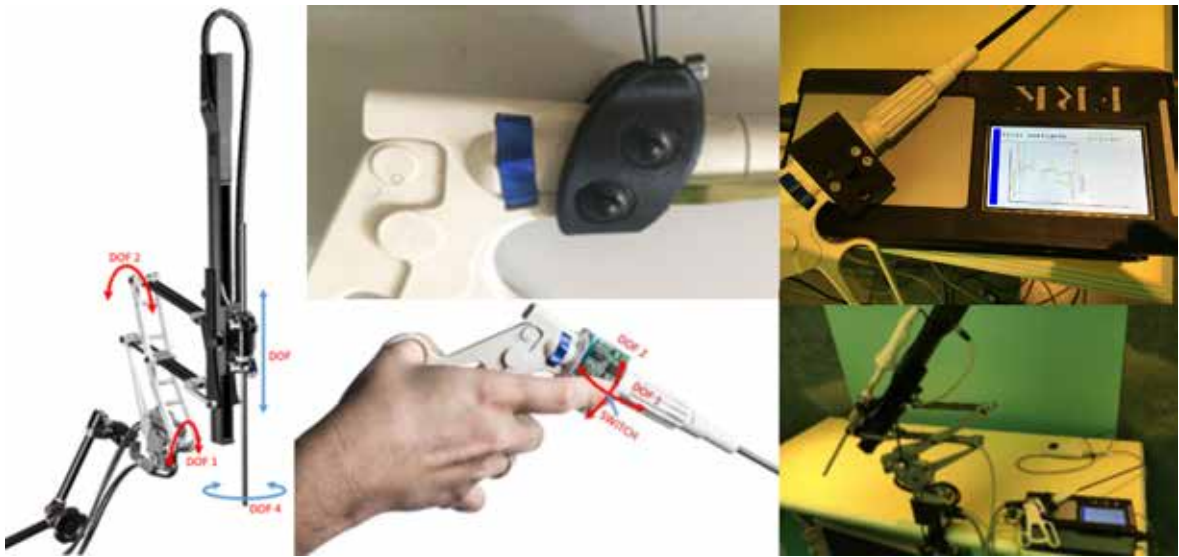
Następnie przeanalizowano kilka modeli narzędzia wyposażonego w opracowane czujniki i dokonano wyboru najkorzystniejszego rozwiązania (Rys. 3).



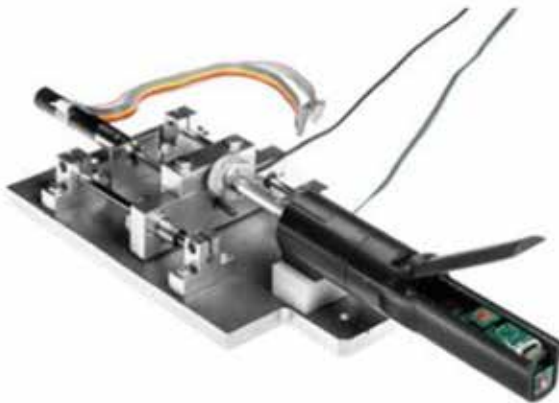
Rysunek 3. Modele CAD narzędzia sensorycznego



Rysunek 4. Przykładowe wyniki otrzymane dla samego czujnika (u góry) oraz pokrytego PDMS (na dole) – czułość i charakterystyka odpowiedzi elementów czujników dla siły przyłożonej w kierunku prostopadłym



Rysunek 5. Prototypy manipulatora w oparciu o wykonany czujnik siły 4 x 4 mm [17]



Rysunek 6. Stanowisko do kalibracji czujników [15]



W kolejnej fazie projektowania, za pomocą oprogramowania COMSOL Multiphysics, wyznaczono parametry fizyczne – efekt zmiany rezystancji pod wpływem odkształcenia – dla różnej geometrii piezorezystywnego czujnika. Czujniki pokryto specjalną osłoną wykonaną z polidimetylosiloksanu (PDMS). W celu optymalizacji sensora przeznaczonego do pomiaru siły w modelu chirurgicznego chwytaka (graspera) badano wpływ technologii pokrycia warstwą ochronną czujnika na jego czułość. Na rys. 4 przedstawiono przykładowe wyniki otrzymane dla tego samego czujnika bez pokrycia oraz z pokryciem warstwą PDMS (sygnał z czterech elementów czujnikowych w membranie chipa – zwany górny, dolny, prawy, lewy).

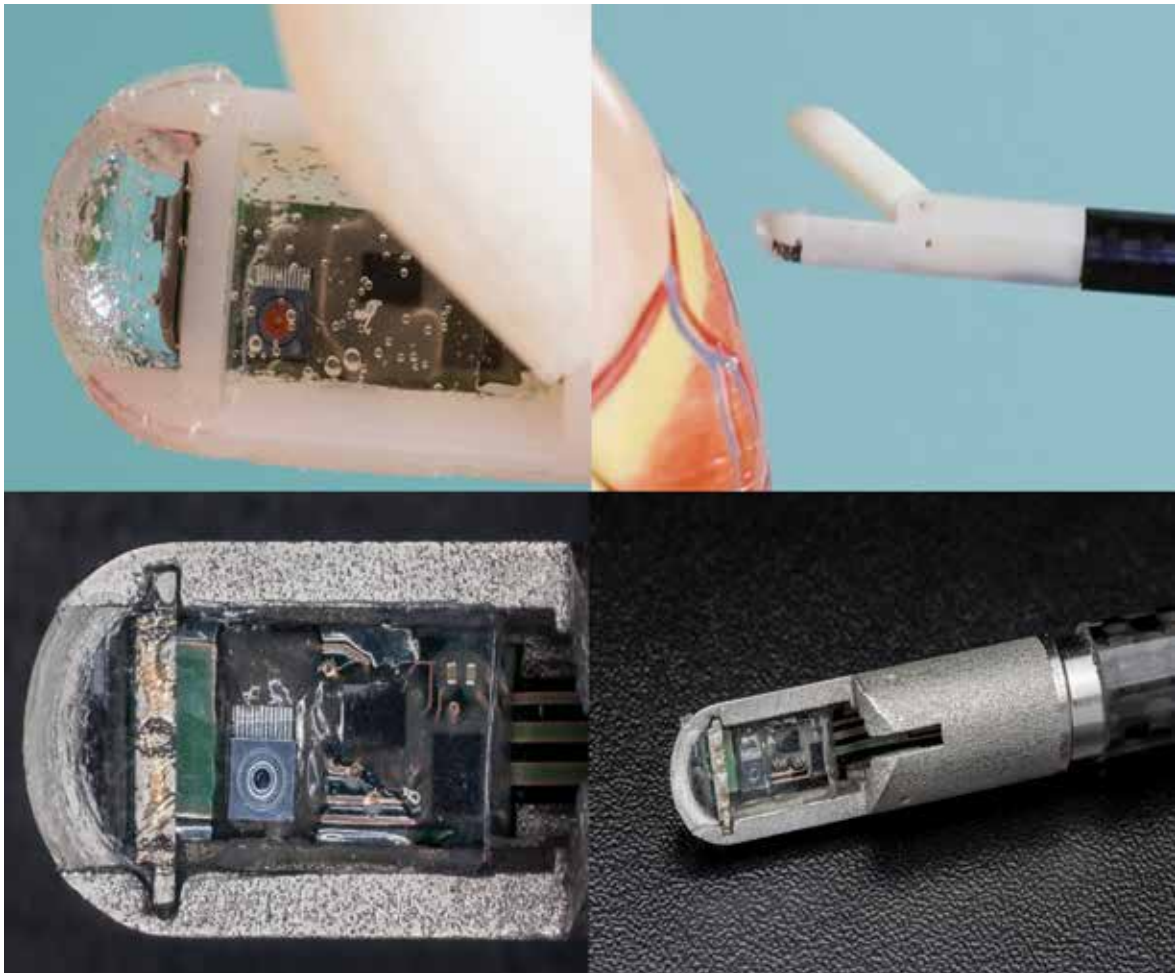
Na potrzeby projektu wykonane zostały trzy czujniki różniące się wielkością, czułością, oraz zakresem pomiarowym:

- pierwszy o wymiarach 1 x 1,25 mm sygnalizujący kontakt narzędzia z tkanką, usytuowany na końcu efektora instrumentu chirurgicznego,

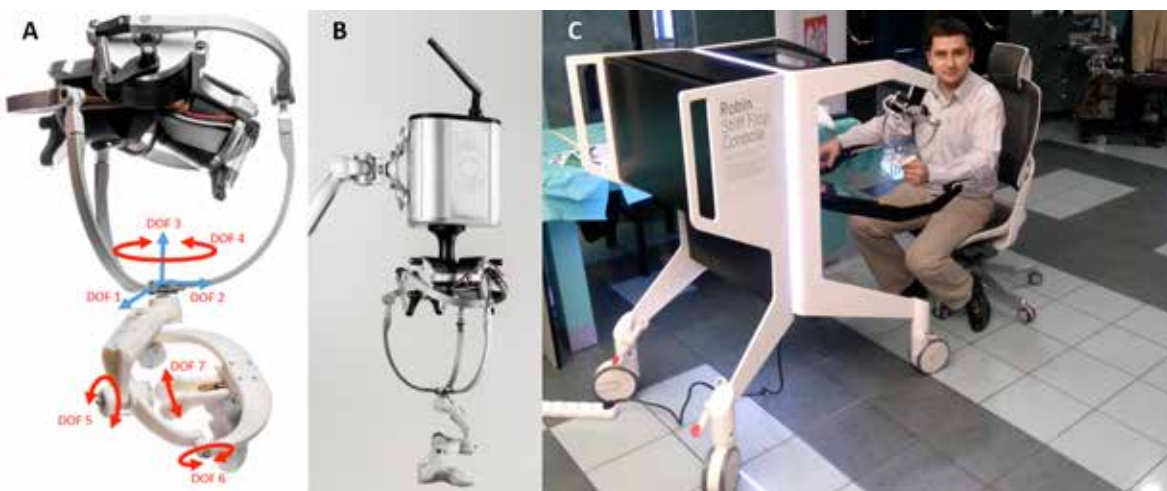
- drugi o wymiarach 2 x 3 mm mocowany wewnątrz narzędzia umożliwiający pomiar siły podczas zaciśnięcia szczęki narzędzia,
- trzeci o wymiarach 4 x 4 mm służący do uruchomienia i sterowania ramieniem robota toru wizyjnego. W czujniku sterującym ramieniem robota zastosowano specjalną osłonę czujnika wykonaną z polidimetylosiloksanu (PDMS).

STEROWANIE ROBOTEM ZA POMOCĄ TRÓJSKŁADOWEGO CZUJNIKA SIŁY

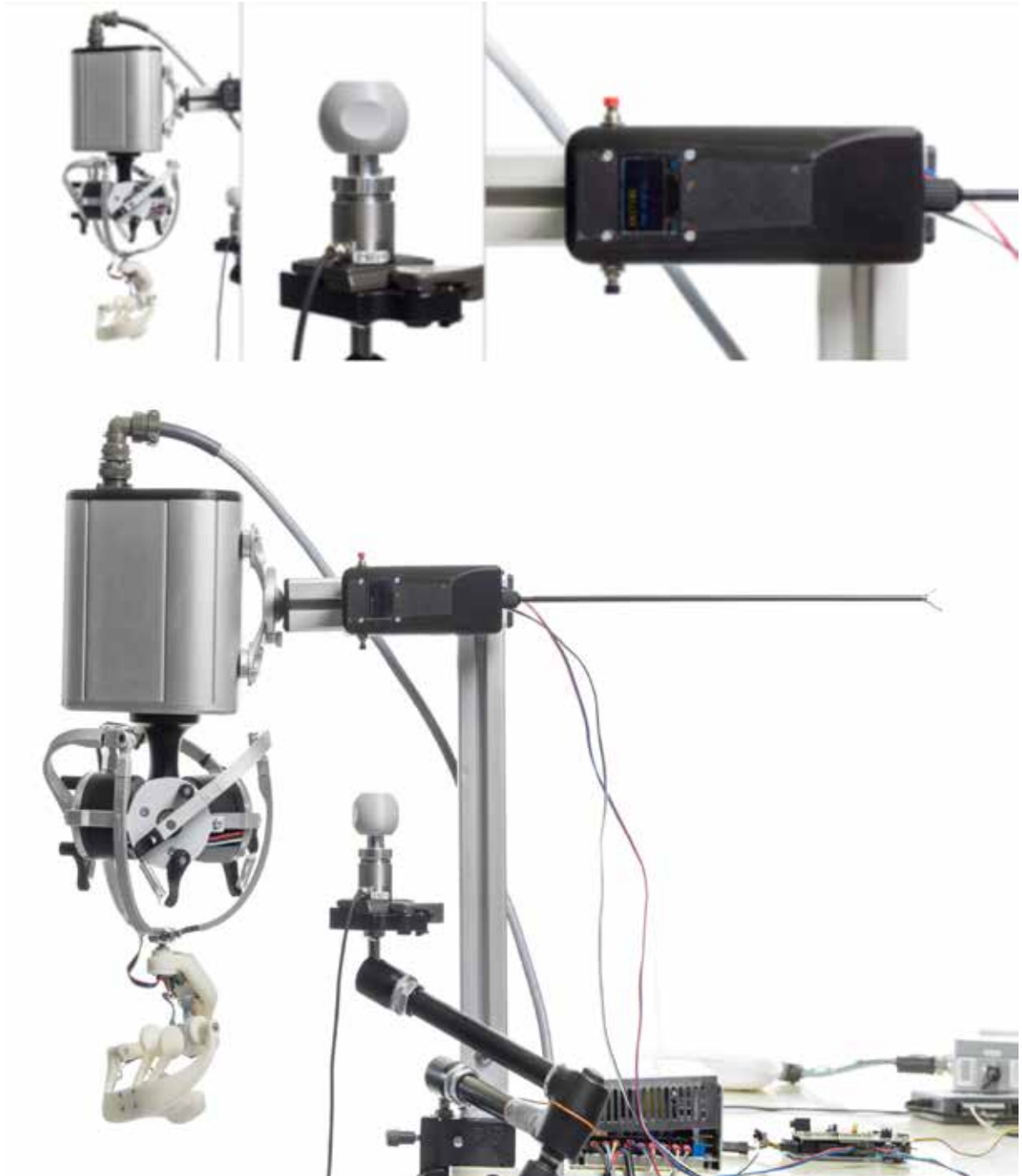
Robot toru wizyjnego zastępujący przy stole operacyjnym asystenta, który trzyma i kieruje endoskopem tak, by na ekranie uwidocznić pracę narzędzi chirurgicznych i wewnątrz pacjenta podczas operacji. Robot może być sterowany za pomocą ekranu dotykowego, pilota lub za pomocą dżoystyka zamocowanego na narzędziu (Rys. 5). W prototypie użyto do sterowania czujnika 3D wraz z przełącznikiem umożliwiającym przełączanie pomiędzy poszczególnymi stopniami swobody,



Rysunek 7. Prototyp narzędzia wykonany metodą szybkiego prototypowania z zastosowanym czujnikiem siły: model wykonany z tworzywa sztucznego metodą FDM, oraz kolejna wersja wykonana ze stopu metali metodą SLM



Rysunek 8. Zadajnik Robin Hand L: a) kinematyka, b) wersja mobilna – komunikacja WiFi, c) konsola sterująca wraz z zaadaptowanym zadajnikiem (projekt Stiff Flop) [6]



Rysunek 9. Demonstrator 1 systemu sprzężenia siłowego

oraz sprzęgłem załączającym pracę robota Robin Heart PVA lub Robin Heart Pelikan. Algorytm sterujący umożliwił sterowanie prędkością przemieszczania się ramienia robota proporcjonalnie do wielkości sygnału z czujnika (siły wywieranej na czujnik).

■ **SENSORYCZNE NARZĘDZIA ROBOTA**

W kolejnym kroku wykonano dwa prototypy narzędzia: jeden stanowiący część składową stanowiska

• pomiarowego służącego do weryfikacji algorytmu
 • zaimplementowanego w oprogramowaniu sterującym oraz do kalibracji czujników (Rys. 6).
 • Drugi w dwóch wersjach jako prototyp narzędzia przeznaczony do badań funkcjonalnych z robotem (Rys. 7).
 • W kolejnym modelu zastosowano system rozproszony. Sygnał z czujników pierorezystywnych jest przetwarzany przez przetwornik analogowo-cyfrowy na postać cyfrową, dane poprzez magistralę I2C przeka-



Rysunek 10. Demonstrator sterowania robotem ze sprzężeniem siłowym. Integracja robota Robin Heart z sensorycznym narzędziem robota

zywane były do układu przetwarzania znajdującego się w górnej części narzędzia obok mechanizmów napędowych. Przetworniki w układzie narzędzia laparoskopowego umieszczono wraz z czujnikami siły na elastycznej płytce drukowanej (typu flex-PCB). Pozwoliło to na zminimalizowanie wpływu zakłóceń na sygnał pomiarowy.

ZADAJNIK RUCHU ZE SPRĘŻENIEM SIŁOWYM

Opracowano oryginalny zadajnik ruchu dla robota chirurgicznego [13, 14]. Zadajnik ruchu Robin Hand wyposażony został w napędy umożliwiające realizację siłowego sprzężenia zwrotnego (stopnie swobody – DOF: 1 do 3), a także dodatkowy obrotowy stopień swobody (DOF 4). Jego najnowsza wersja Robin Hand L przystosowana została do adaptacji na potrzeby projektu Stiff-flop z możliwością realizacji 7 stopni swobody (Rys. 7a). Poprawiona została także ergonomia części chwytowej dopasowana do dłoni operatora. Zadajnik ten dostępny jest w dwóch wersjach: mobilnej – mocowanej na przegubowym ramieniu (Rys. 7b), oraz zintegrowaną konsolą sterującą (Rys. 7c) [6].

Jako etap pośredni integracji czujnika siły 3D z robotami (dla dopracowania programu sterowania

robotem) przygotowano demonstrację modelu podczas konferencji EUROSENSORS 2016 w Budapeszcie składającego się z czujnika siły 6D firmy SCHUNK w obwodzie sprzężenia zwrotnego z narzędziem chirurgicznym sterowanym za pomocą Robin Hand. Na specjalnym ekranie monitora zostały przedstawione animacje ruchu. Przetestowano oprogramowanie i niektóre elementy sprzętowe systemu.

Zgodnie z planem kolejny etap integracji dotyczył zastosowania czujników opracowanych przez węgierski zespół prowadzony przez Pétera Fürjesa. Połączono mechanicznie i elektronicznie końcówkę narzędzia znajdującą się na ramieniu robota Robin Heart mc^2 z zadajnikiem ruchu Robin Hand (Rys. 9). Komunikacja pomiędzy systemem czujników a pracą systemu sterowania odbywała się za pośrednictwem interfejsu CAN z własnym protokołem komunikacyjnym. Pomiar siły z wykorzystaniem nowego czujnika (rezystancyjnego) jest realizowany analogowo (mostek Wheatstonea) a następnie przetwarzane na postać cyfrową wyprowadzany jest magistralą I2C. Dalej dane są wysyłane do mikroprocesora z rodziny PIC (zaprogramowanego przez zespół węgierski), który odbiera dane z czujnika, filtruje zakłócenia i końcową obliczoną wartość siły wysyła do innego mikrokontrolera z rodziny STM 32 specjalnie oprac

cowanym protokołem CAN Autibus (zaprogramowany przez zespół FRK) [15]. System z powodzeniem zademonstrowano podczas grudniowej konferencji Roboty Medyczne/Medical Robots 2016.

■ PODSUMOWANIE

Sukces robotów w chirurgii zależy od wielu czynników. Po pierwsze – skutecznych, precyzyjnych mechatronicznych narzędzi. Po drugie – sprawnego, ergonomicznego systemu sterowania. Od tych dwóch czynników zależy bezpieczeństwo i efektywność wciąż rozwijających się technologicznie narzędzi chirurga. Dzisiaj chirurg operuje robotami w których poprawność wykonywanych czynności oceniana jest ze sprzężeniem zwrotnym wzrokowym. Opóźnienia podczas przesyłania obrazu w telemannipulatorach powoduje ograniczenia stosowania teleoperacji, a chirurg generalnie operuje ostrożnie i wolniej niż narzędziami laparoskopowymi. Interfejs człowiek – maszyna HMI (*Human-Machine Interface*) to system komunikacji, który powinien być optymalizowany do określonych zadań. Brak informacji dotykowych, sprzężenia siłowego, upośledza sprawność chirurga podczas operacji i zwiększa ryzyko popełnienia błędu. Lekarze oczekują szybkich postępów w zakresie wdrażania narzędzi o walorach nie tylko manipulacyjnych, ale również informacyjnych.

Badania prowadzone przez polski zespół Robin Heart Team są wspierane obecnie przez węgierski zespół fizyków i inżynierów opracowujących nowe czujniki do zastosowania w robocie Robin Heart. Badania prowadzone z zastosowaniem sensorycznych robotów dowodzą, że wprowadzenie do praktyki klinicznej sensorycznych robotów pozwoli na osiągnięcie pożądaných przez lekarzy i ich pacjentów standardów chirurgicznych. Badania prototypowych czujników wykazały ich przydatność do oceny stanu tkanki (sensor dotykowy) oraz do oceny siły zaciśnięcia uchwytu chirurgicznego dla układu sprzężenia siłowego robota chirurgicznego. Przetestowano pierwsze modele narzędzia z czujnikami, przygotowano specjalne zadajniki ruchu pozwalające na odczucie reakcji siłowej oraz system sterowania. Kolejny – ostateczny demonstrator – w pełni funkcjonalny system robota ze sprzężeniem siłowym oraz narzędzie mechatroniczne ze sprzężeniem siłowym będzie poddany badaniom jesienią 2017 r. Dzięki współpracy finansowanej z projektu europejskiego INCITE (koordynowanego przez Philips) polski robot ma szansę osiągnąć funkcjonalne własności nieobecne w produktach rynkowych dzisiaj. Dzięki wprowadzonych innowacjach można oczekiwać wzrostu zainteresowania robotami chirurgicznymi w dziedzinach, gdzie obecnie stosowane roboty nie spełniły oczekiwań odbiorców, takich jak kardiochi-

urgia. Bezpieczeństwo i precyzja w znacznej mierze zależy od wprowadzenia nowej jakości czułości i komfortu sterowania robotów.

■ ACKNOWLEDGEMENTS

This work was done in the frame of the ENIAC “INCITE” project No.621278 and partially financed by the ENIAC JU and National Centre for Research and Development (NCBR) and the National Research, Development and Innovation Fund (NKFI) via NEMZ_12-1-2014-0005 grant.

■ LITERATURA:

- [1] L., Drabik, E. Sobol, Słownik języka polskiego PWN, Wydawnictwo Naukowe PWN, ISBN: 97883-01173777, 2013.
- [2] Z. Nawrat: Robot Robin Heart – projekty, prototypy, badania, perspektywy, Rozprawa habilitacyjna nr 24/2011, ISBN 978-83-7509-191-5, ISSN 1689-6262, Katowice 2011.
- [3] Ł. Mucha: Interfejs użytkownika robota – przegląd urządzeń zadawania ruchu systemów sterowania telemannipulatorów, *Medical Robotics Reports*, vol. 4, 2015, s. 39–48.
- [4] Bidard C., Brisset J., Gosselin F.: Design of a high-fidelity haptic device for tele-surgery. *Proc. IEEE ICRA 2005, Barcelona, Spain, 2005*, 205–210.
- [5] Cavusoglu M.C., Yan J., Sastry S.S.: A hybrid system approach to contact stability and force control in robotic manipulators. *Proc. 12th IEEE ISIC 1997, Istanbul, Turkey, 1997*, 143–148.
- [6] Ł. Mucha, K. Lehrich, Z. Nawrat, K. Rohr, K. Lis, W. Sadowski, D. Krawczyk, P. KroczeK, Z. Małota: Postępy budowy specjalnych interfejsów operatora robota chirurgicznego Robin Heart, *Medical Robotics Reports*, vol. 4, 2015, s. 39–48.
- [7] Sallé D., Bidaud P., Morel G.: Optimal design of high dexterity modular MIS instrument for coronary artery bypass grafting. *Proc. IEEE ICRA 2004, New Orleans, USA, 2004*; 2: 1276–1281.
- [8] Rosen J., Brown J.D., Chang L., Barreca M., Sinanan M., Hannaford B.: The BlueDRAGON – a system for measuring the kinematics and the dynamics of minimally invasive surgical tools in-vivo. *Proc. IEEE ICRA 2002, Washington, DC, 1876–1881*.
- [9] Iwata H.: Pen-based haptic virtual environment. *Proc. IEEE Virtual Reality Annual International Symposium, Seattle, USA, 1993*.
- [10] Braun E.U., Mayer H., Knoll A., Lange R., Bauernschmitt R.: The must-have in robotic heart surgery: haptic feedback. *Medical Robotics*. Ed. V. Bozovic. Vienna: I-Tech Education and Publishing 2008, 9–21.
- [11] Warren S. Grundfest, Martin O. Culjat, Chih-Hung King, Miguel L. Franco, Christopher Wottawa, Catherine E. Lewis, James W. Bissley, Erik P. Dutton, Development and Testing of a Tactile Feedback System for Robotic Surgery. *Medicine Meets Virtual Reality 17*; J.D. Westwood et al. (Eds.), IOS Press, 2009.
- [12] Z. Nawrat, K. Rohr, P. Fürjes, Ł. Mucha, K. Lis, J. Radó, C. Dücső, P. Földesy, W. Sadowski, D. Krawczyk, P. KroczeK, G. Szébenyi, P. Soósd, Z. Małota: Robin Heart Force Feedback/Control System Based on INCITE Sensors-preliminary study, *Medical Robotics Reports*, vol. 4, 2015, s. 11–17.
- [13] Z. Nawrat, K. Lis, K. Rohr, Ł. Mucha: Manipulator of a medical device, Patent USA, US 9393688 B2, 2016.
- [14] Z. Nawrat, K. Lis, Ł. Mucha, K. Lehrich: Rama nośna narzędzia medycznego. Wzór użytkowy, Polska, nr W.123845, 2015.
- [15] Nawrat Z., Rohr K., Fürjes P., Mucha Ł., Lis K., Radó J., Dücső C., Földesy P., Sadowski W., Krawczyk D., KroczeK P., Szébenyi G., Soósd P., Małota Z.: Force Feedback Control System Dedicated for Robin Heart Surgical Robot, *Procedia Engineering*; Vol. 168, 2016, Pages 185–188, DOI.org/10.1016/j.proeng.2016.11.213.
- [16] Ł. Mucha, Z. Nawrat, K. Lis, K. Lehrich, K. Rohr, P. Fürjes, C. Dücső; Sterowanie robotem Robin Heart Pelikan z zastosowaniem siłowego sprzężenia zwrotnego / Force feedback control system dedicated for Robin Heart Pelikan, *Acta Bio-Optica et Informatica Inżynieria Biomedyczna*, ISSN 1234-5563, Vol. 22 nr 3 2016, s.146-153.
- [17] K. Lis, K. Lehrich, Ł. Mucha, Z. Nawrat: Lekki manipulator toru wizyjnego Pelikan / Pelikan light visual track manipulator”, *Acta Bio-Optica et Informatica Inżynieria Biomedyczna*, ISSN 1234-5563, Vol. 22 nr 3 2016, s.154-159 18 Concept of application of the light-weight robot Robin Heart (“Pelikan”) in veterinary medicine: a feasibility study Lis K., Lehrich K., Mucha Ł., Nawrat Z., *Med. Weter. Vol.73 No.2 pp.88-91 ref.19*, DOI: 10.21521/mw.5640.