

STEROWANIE ROBOTEM ROBIN HEART PELIKAN Z ZASTOSOWANIEM SIŁOWEGO SPRZĘŻENIA ZWROTNEGO

FORCE FEEDBACK CONTROL SYSTEM DEDICATED FOR ROBIN HEART PELIKAN

Łukasz Mucha^{1*}, Zbigniew Nawrat¹, Krzysztof Lis², Krzysztof Lechrich²,
Kamil Rohr¹, Péter Fürjesb³, Csaba Dücső³

¹ Fundacja Rozwoju Kardiochirurgii, Pracownia Biocybernetyki,
41-800 Zabrze, ul. Wolności 345a

² Politechnika Śląska, Mechaniczny Technologiczny, Katedra Budowy Maszyn,
44-100 Gliwice, ul. Konarskiego 18a

³ Centre for Energy Research, Institute of Technical Physics and Materials Science,
H-1121 Budapest, Konkoly-Thege 29-33

*e-mail: lmucha@frk.pl

STRESZCZENIE

Przedmiotem niniejszej pracy jest badanie systemów sterowania robota Robin Heart PVA (ang. *Port Vision Able*) z zastosowaniem specjalnych mikroczujników siły 3D MEMS. Postawiono trzy różne sposoby wykorzystania opracowywanych czujników: (1) jako czujnik siły wykorzystany jako mikrodrojstik zintegrowany w rękojeści narzędzia endoskopowego, aby łatwo kontrolować ruch robota wizyjnego podczas pracy chirurga; (2) jako czujnik siły wewnątrz szczęki narzędzia endoskopowego dla dostarczenia informacji zwrotnej do operatora-chirurga, mierząc siłę chwytu; (3) jako czujnik wielowymiarowy dotyku na końcu narzędzia chirurgicznego, co ułatwia badanie palpacyjne do diagnostyki tkanek podczas pracy. Artykuł ten jest studium wykonalności w zakresie proponowanych zastosowań. Model sterowania robota przy użyciu prototypowego czujnika siły 3D został pomyślnie przetestowany w badaniach funkcjonalnych robota. Wstępne badania sensorów wykazały ich przydatność dla sterowania robotem ze sprzężeniem siłowym, aby ocenić stan tkanek oraz do oceny siły docisku chirurgicznego chwytaka.

Słowa kluczowe: czujnik piezorezystancyjny, operacje laparoskopowe, Robin Heart, roboty medyczne, siłowe sprzężenie zwrotne, zadajnik ruchu

ABSTRACT

The aim of this work is to investigate the control systems of Robin Heart PVA (Port Vision Able) using special 3D MEMS force microsensors. Three different functions are targeted: (1) micro-joystick actuator to be integrated in the hilt of the laparoscope to easily control robotic movement during operation; (2) force sensor inside the laparoscopic jaw to provide feedback to the surgeon by measuring the grasping strength; (3) 3D force/tactile sensor which facilitates palpation for tissue diagnostics during operation. This paper is a feasibility

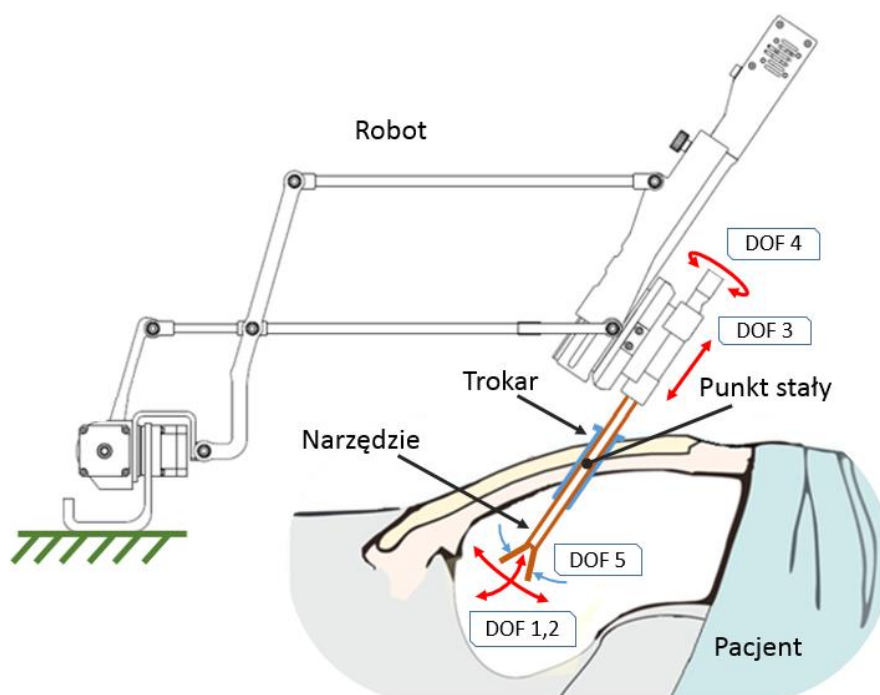
study regarding these proposed applications. A model of the robot controller using a prototype 3D sensor force has been successfully tested during the study of functional robot. Pre-studies of prototype sensors have demonstrated their usefulness in robot force feedback system to assess the state of tissue and to assess the clamping force the grasper surgical system.

Keywords: piezoresistive sensor, minimal invasive surgery, Robin Heart, medical robots, force feedback, haptic

1. Wstęp

Do głównych zadań robota przeznaczonego do operacji laparoskopowych (minimalnie inwazyjnych) należy manipulacja narzędziami medycznymi z zachowaniem stałego punktu przejścia przez powłoki skórne w taki sposób, aby końcówka narzędzia odzwierciedlała ruchy dłoni operatora siedzącego za pulpitem konsoli sterującej [1, 2]. Do podstawowych sygnałów dostarczanych przez sterownik ruchu trzymany przez operatora należy zaliczyć: pozycję (przemieszczenie) oraz prędkość z jaką ma się poruszać narzędzie, ewentualnie inne wielkości fizyczne.

Narzędzia wykorzystywane podczas zabiegu posiadają zazwyczaj co najmniej 4 stopnie swobody (4DOF), co przyczynia się do znacznego ograniczenia przestrzeni operacyjnej wewnątrz jamy brzusznej pacjenta. Piąty stopień swobody 5 DOF stanowi indywidualny charakter danego narzędzia np. jeżeli jest to grasper wówczas odpowiadać on będzie za otwarcie i zamknięcie szczęk instrumentu [3, 4, 5]. Idea takiego działania została przedstawiona na rysunku 1. Bardziej zaawansowane narzędzia posiadające więcej stopni swobody umożliwiają dodatkowe kątowe wychylenie efektora wewnątrz jamy brzusznej zwiększając w ten sposób przestrzeń roboczą, oraz ergonomię pracy [6, 7].



Rys. 1. Schemat operacji laparoskopowej z użyciem robota stałopunktowego

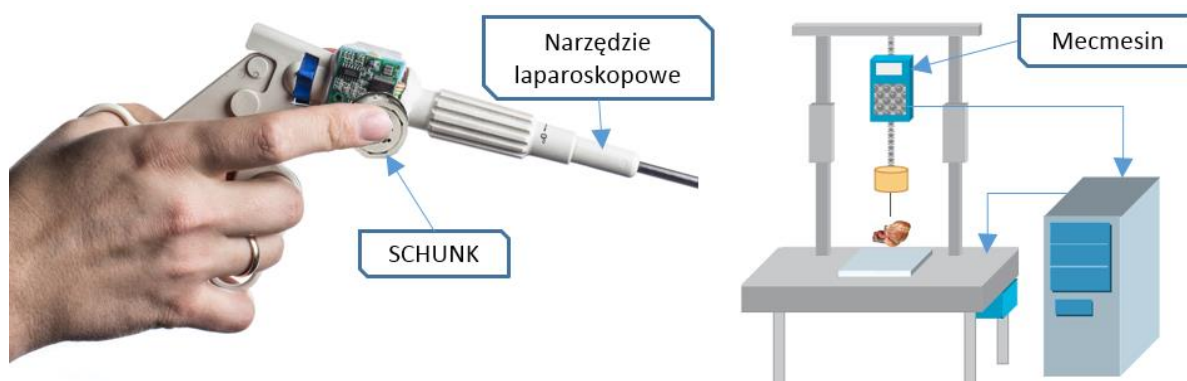
Dopasowanie przestrzeni roboczej zadajnika do przestrzeni roboczej manipulatora wymaga często zmiany przesuwania układu współrzędnych dotyczącego manipulowanej przestrzeni roboczej (wysprzęglanie i zasprzęglanie w innej pozycji) [8]. Konieczność stosowania sprzęgła przełączającego podczas dokonywania manipulacji na większym obszarze roboczym, a także brak siłowego sprzężenia zwrotnego jest jednym z podstawowych problemów ograniczających postęp rozwoju stosowania robotów w chirurgii [9]. Brak oddziaływań haptycznych narzędzia z narządami powoduje, że chirurg podczas manipulacji zadajnikiem ruchu czuje się niekomfortowo ponieważ odebrany zostaje mu jeden

ze zmysłów – zmysł czucia [10, 11]. Aby wyeliminować te niedogodności związane z operacją wykonywaną przez roboty – teleoperacją, zespół naukowców z Polski oraz Węgier w ramach projektu INCITE (ang. *Intelligent Catheters in Advanced Systems for Interventions*) opracował narzędzie, oraz system sterowania zbudowany w oparciu o czujniki siły. Opracowane narzędzie współpracujące z zadajnikiem ruchu realizującym siłowe sprzężenie zwrotne (ang. *Force Feedback*) pozwoli operatorowi na subiektywne czucie kontaktu instrumentu chirurgicznego z pacjentem [12]. Wysoka precyzja i ergonomiczny system sterowania robotem stwarza miejsce dla robota Robin Heart na arenie międzynarodowej jako jedno z najbardziej innowacyjnych narzędzi chirurgicznych. Jest on bezpieczny dla pacjenta i wygodny dla chirurga [13, 14].

2. Wstępne założenia projektowe

W pierwszym etapie projektowania narzędzi oraz doboru parametrów torów pomiarowych dokonano wstępnej oceny maksymalnych wartości sił oddziaływujących na narzędzie podczas wykonywania zabiegu. W tym celu przeprowadzone zostały badania oddziaływania organów na narzędzie polegające na: ściskaniu, przecinaniu, oraz łączeniu tkanek miękkich pochodzenia zwierzęcego.

Do badań wykorzystano urządzenie pomiarowe o unikalnej konstrukcji (ekstensometr), w którego skład wchodziły do wyboru dynamometr Mecmesin AVG 250 N lub 25 N. Wykorzystany system sterowania umożliwił zastosowanie odpowiedniego trybu testu, zapisu oraz analizy danych. Przeprowadzono także badania siły jaką operator jest w stanie wywrzeć na narzędzie za pomocą palca wskazującego. Jako aparatury badawczej użyto sześciosiowego czujnika siły czujnik Nano 25 firmy SHUNK. Badania te miały na celu dobór odpowiedniego czujnika dedykowanego dla systemu sterującego robotem toru wizyjnego Robin Heart Vision [15, 16]. Na podstawie przeprowadzonych badań podjęto decyzję o budowie 3 typów czujników różniących się między sobą zarówno wielkością, dokładnością jak i zakresem mierzonych sił.



Rys. 2. Stanowiska pomiarowe: pomiar siły wywieranej przez palec wskazujący (po lewej) oraz schemat stanowiska do pomiaru sił podczas wbijania, przecinania, łączenia tkanek miękkich (po prawej)

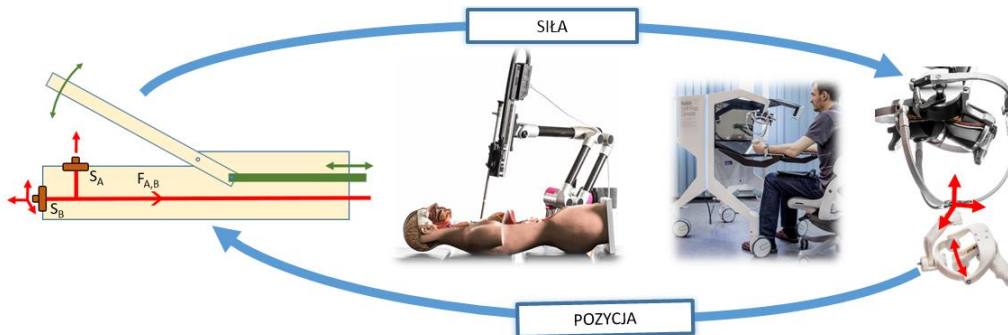
3. Czujnik siły

W oparciu o sprecyzowaną specyfikację czujniki siły zostały zaprojektowane i wykonane przez firmę 3D Silicon. Pierwsze prototypy obejmowały typoszereg trzech czujników, z których dwa usytuowano w efektorze narzędzia (p. rys. 3). Posłużyły one do realizacji siłowego sprzężenia zwrotnego, natomiast trzeci typ dedykowany został dla systemu sterowania. Zamocowano go bezpośrednio na części chwytowej narzędzia laparoskopowego, umożliwiając manipulację robotem toru wizyjnego przy pomocy palca wskazującego [17].

Czujniki wykonane zostały w technologii MEMS bazując na czterocalowych waflach krzemowych i borokrzemianowych. Dla określenia dokładnych parametrów geometrycznych (grubości membrany, wymiarów bocznych) oraz czułości wbudowanych piezorezystorów zastosowano metodę elementów skończonych (MES), gdzie szczegółowo przeanalizowano parametry. Lokalna zmiana oporności będąca efektem odkształcenia wywołanego naprężeniem oraz efektów piezorezystywnych została

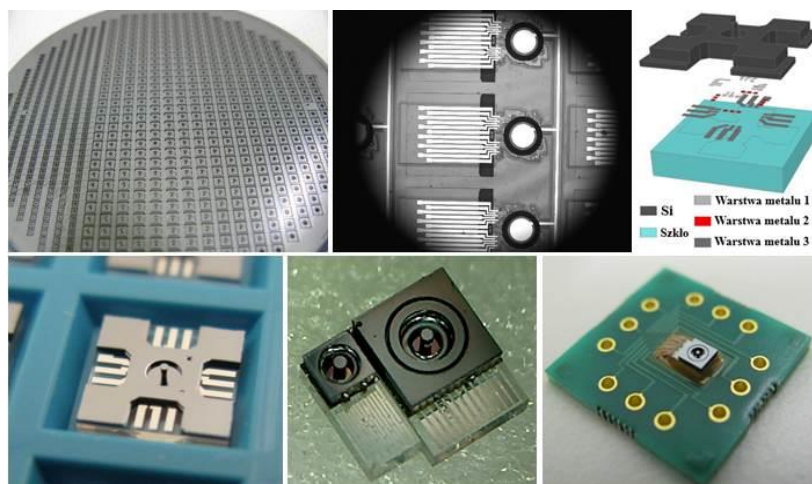
obliczona za pomocą oprogramowania COMSOL Multiphysics. Pozwoliło to na określenie wartości wyjściowych czujnika. W przypadku membrany o średnicy 900 μm i grubości 50 μm obliczona czułość czujnika wyniosła 30 mV/N. Na potrzeby projektu wykonane zostały trzy czujniki różniące się wielkością, czułością, oraz zakresem pomiarowym:

- pierwszy o wymiarach 1×1,25 mm sygnalizujący kontakt narzędzia z tkanką, usytuowany na końcu efektor instrumentu chirurgicznego S_B (p. rys. 3),
- drugi o wymiarach 2×3 mm mocowany wewnątrz narzędzia umożliwiający pomiar siły podczas zaciskania szczęki narzędzia S_A ,
- trzeci o wymiarach 4×4 mm służący do uruchomienia i sterowania ramieniem robota toru wizyjnego.



Rys. 3. Schemat rozmieszczenia czujników w efektorze narzędzia oraz idea siłowego sprzężenia zwrotnego

Usytuowanie czujników w ten sposób umożliwiło pomiar siły podczas kontaktu z tkankami oraz trzymany przedmiot, np. igłą lub tkanką, zapewniając siłowe sprzężenie zwrotne w zadajniku [18].



Rys. 4. Czujnik siły [14]

Na rysunku 4 przedstawiono budowę czujnika oraz wafel krzemowy, z którego został wykonany. Grubość błony 10 i 50 mikrometrów zapewnia czułość odpowiednio 170 i 50 mV/N napięcia wyjściowego w przypadku obciążania prostopadłego czujnika nieosłoniętego. Alternatywna geometria membrany w połączeniu z różnymi wariantami osłony czujnika przed zanieczyszczeniem pozwoliła wybrać najbardziej odpowiednie parametry dla docelowego zastosowania. Czujnik siły o wymiarach 4×4 mm, średnicy membrany 900 μm oraz grubości 50 μm został wykorzystany jako zadajnik ruchu dla ramienia robota pozycjonującego kamerę endoskopową [19]. W czujniku sterującym ramieniem robota zastosowano specjalną osłonę czujnika wykonaną z polidimetylosiloksanu (PDMS). Osłona ta została wykonana w wersji barwnej w celu osłony przed światłem zewnętrznym.

4. Prototypy zadajnika i narzędzia

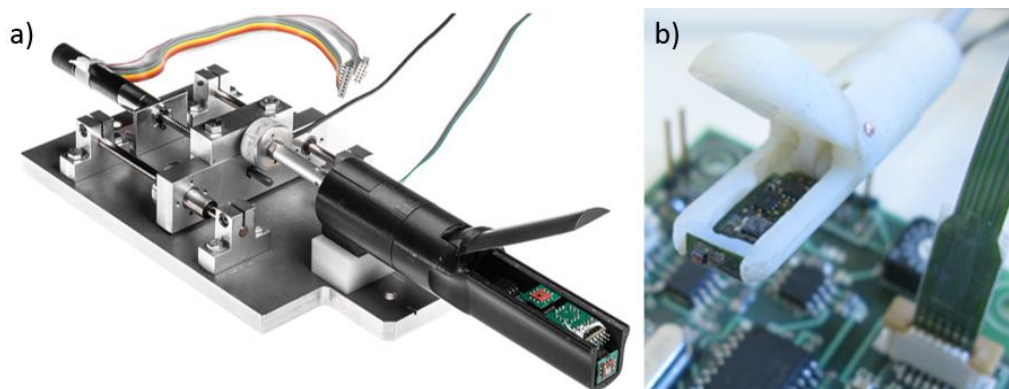
Jeden z przedstawionych w poprzednim rozdziale czujników wykorzystano do budowy zadajnika ruchu. Algorytm sterowania oparto na wykorzystaniu proporcjonalnego do siły sygnału z czujnika do sterowania prędkością przemieszczania się ramienia robota. Uzyskano dzięki temu zwiększenie zakresu realizowanego przemieszczenia w stosunku do obecnie stosowanego rozwiązania. Projekt zakładał montaż takiego urządzenia na narzędziu laparoskopowym stosowanym w szpitalach.

W prototypie użyto do sterowania czujnika umożliwiającego pomiar w trzech osiach XYZ, gdzie Y, Z odpowiadało ruchowi robota pozwalającemu na przesuwanie pola widzenia. W tym celu następował ruch w pierwszym (DOF 1) i drugim (DOF 2) stopniu swobody. Kierunek w osi X umożliwiał przełączenie sterowania pomiędzy DOF 1,2 a DOF 3,4 (DOF 3 – wsunięcie i wysunięcie kamery z portu, DOF 4 – obrót kamery w porcie, obrót pola widzenia). Dla robota toru wizyjnego system taki zapewniał możliwość sterowania wszystkimi czterema stopniami swobody jakie posiada robot. Z powodu kłopotliwego przełączania pomiędzy poszczególnymi stopniami swobody, wykonana została kolejna wersja wyposażona w dwa czujniki umożliwiające realizację przemieszczenia dla pięciu stopni swobody 5 DOF (piąty stopień daje możliwość otwarcia i zamknięcia szczęk instrumentu chirurgicznego). Rozwiązanie takie umożliwiło łatwą manipulację bez konieczności stosowania dodatkowych uchwytów przeznaczonych dla palca wskazującego niezbędnych dla realizacji przemieszczenia dla DOF 3 w obu kierunkach. Idea sterowania oraz wykonane prototypy zostały przedstawione na rysunku 5.



Rys. 5. Prototypy manipulatora w oparciu o wykonany czujnik siły 4x4 mm [20]

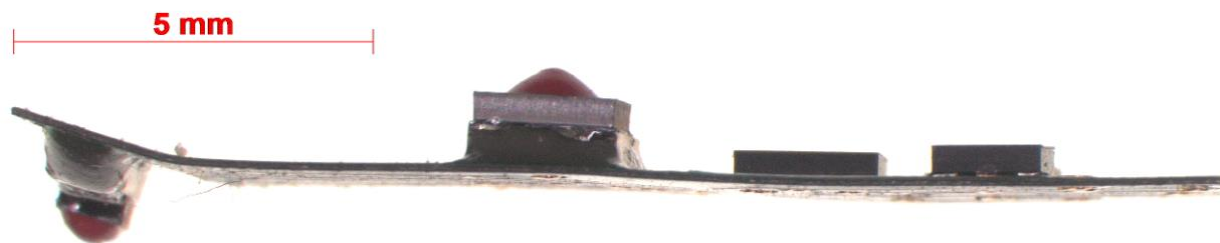
W kolejnym kroku wykonano dwa prototypy narzędzia: pierwszy stanowiący część składową stanowiska pomiarowego służącego do weryfikacji algorytmu zaimplementowanego w oprogramowaniu sterującym oraz do kalibracji czujników (p. rys. 6a). Drugi prototyp narzędzia przeznaczony był do badań wstępnych z użyciem tkanek (p. rys. 6b).



Rys. 6. Stanowisko pomiarowe do weryfikacji czujników siły (a), oraz efektor narzędzia laparoskopowego (b)

Aby zminimalizować wielkość oraz liczbę prowadzonych przewodów elektrycznych dla drugiej wersji narzędzia układ pomiarowy zaprojektowany został jako system rozproszony. Sygnał z czujników pierorezystywnych jest przetwarzany przez przetwornik analogowo-cyfrowy na postać cyfrową. Przetworniki w układzie narzędzia laparoskopowego umiejscowione są wraz z czujnikami siły na flex-PCB (p. rys. 7). Tak bliskie ułożenie przetworników pozwoliło na zminimalizowanie wpływu zakłóceń na sygnał pomiarowy. Następnie dane poprzez magistralę I²C przekazywane były do układu przetwarzania znajdującego się w górnej części narzędzia obok mechanizmów napędowych.

W układzie przetwarzania sygnały pochodzące z czujników filtrowano, transportowano za pomocą macierzy przekształceń i przeliczono na wartości sił. Nadrzędny system sterujący ma możliwość odpytania układu przetwarzania o aktualne występujące wartości sił za pomocą magistrali CAN i odpowiedniej reakcji zależnej od ich wartości. Dzięki takiemu rozwiązaniu możliwa była zmiana parametrów macierzy przekształceń oraz filtracji, a tym samym kalibracja układu pomiarowego siły dla danego czujnika [21].



Rys. 7. Czujniki przeznaczone dla narzędzia wykonane na flex-PCB

5. Podsumowanie

Interfejs człowiek-maszyna HMI (ang. *Human-Machine Interface*) to system komputerowy, który ma współpracować z człowiekiem w celu dostarczenia informacji, przyjmowania poleceń i wskazówek. Problem, jak wiernie przekazać ruchy chirurga na manipulator robota i sprawić, aby ręka chirurga odczuła dotyk i opór, do dziś stanowi obiekt wielu badań.

Bidard i wsp. [22] dokonali przeglądu i opisu prac projektowych urządzenia wejściowego dla telechirurgii. Dobry zadajnik ruchu HMI musi być transparentny. Operator powinien się czuć jakby wykonywał zadania zdalnego sterowania bezpośrednio we właściwym środowisku i swobodnie poruszając się w wolnej przestrzeni, wyczuwać kontakt z napotykanymi przeszkodami. Pełne poczucie obecności wewnątrz pola operacji wymaga poczucia siły w szczękach trzymających tkanek czy igłę oraz oddziaływania siłowego między narzędziami, narzędziem i troakarem [23].

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. Wykonano model układu sterowania robotem za pomocą prototypowego czujnika siłowego 3D, który

z powodzeniem został przetestowany podczas badań funkcjonalnych robota (badania sterowania robotem podczas warsztatów chirurgicznych ok. 200 osób, studentów i lekarzy). Wstępnie przeprowadzone badania prototypowych czujników wykazały ich przydatność do oceny stanu tkanki (sensor dotykowy) oraz do oceny siły zaciskania uchwytu chirurgicznego dla układu sprzężenia siłowego robota chirurgicznego. Przetestowano pierwsze modele narzędzia z czujnikami, przygotowano specjalne zadajniki ruchu pozwalające na odczucie reakcji siłowej oraz cały system sterowania. Za kilka miesięcy przetestowane zostanie kompletne rozwiązanie – robota narzędziowego sterowanego z konsoli ze sprzężeniem siłowym. Dzięki naszej współpracy finansowanej z projektu europejskiego INCITE (koordynowanego przez Philips) polski robot ma szansę osiągnąć funkcjonalne własności tak poszukiwane przez przyszłych odbiorców – lekarzy i ich pacjentów.

Acknowledgements

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

LITERATURA

- [1] G. Religa, M. Zembala, R. Cichoń, N. Nawrat, P. Kostka, W. Dybka, K. Rohr, L. Podsedkowski, J. Śliwka, *Pierwsze eksperymenty na zwierzętach robota chirurgicznego Robin Heart*, *Pomiary Automatyka Robotyka*, 2010, s. 539–545.
- [2] K. Mianowski, P. Wroblewski, Z. Nawrat, L. Podsedkowski, P. Kostka, M. Baczyński: *Robin Heart in 2002 – actual state of Polish Cardio-Robot*, *Proceedings of 3rd International Workshop on Robot Motion and Control*, 2002, s. 33–38.
- [3] F.W. Mohr, J.F. Onnasch, V.Falk, T. Walther, A. Diegeler, F. Krakor Schneider, R. Autschbach: *The evolution of minimally invasive valve surgery - 2 year experience*, *European Journal of Cardiothorac Surgery*, 1999, vol. 15(3), s. 238–247.
- [4] 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.
- [5] Z. Nawrat, P. Kostka, K. Lis, K. Rohr, Ł. Mucha, K. Lehrich, W. Sadowski, K. Krzysztofik, Z. Małota: *Interfejs operatora robota chirurgicznego - oryginalne rozwiązania sprzężenia informacyjnego i decyzyjnego*, *Medical Robotics Reports*, vol. 2, 2013, s. 12–31.
- [6] K. Lehrich, Ł. Mucha, K. Rohr, Z. Nawrat, K. Lis: *Zastosowanie technologii druku 3D w konstrukcji prototypów manipulatorów medycznych*, *Mechanik*, vol. 3, 2016, s. 224–225.
- [7] 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.
- [8] Ł. Mucha: *Interfejs użytkownika robota – przegląd urządzeń zadawania ruchu systemów sterowania telemanipulatorów*, *Medical Robotics Reports*, vol. 4, 2015, s. 39–48.
- [9] P. Sauer, K. Kozłowski, W. Waliszewski, P. Jeziorek: *ASYSTENT - Control System of a Manipulator for Keyhole Surgery*, *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, vol. 26(4), 2006, s. 55–70.
- [10] M. Witkowski, K. Mianowski: *Projekt wstępny manipulatora nośnego nowego typu dla robota do chirurgii narządów wewnętrznych*, *Postępy Technologii Biomedycznych BioMedSilesia*, Zabrze 2007, s. 336–355.
- [11] K. Lis, K. Lehrich, Ł. Mucha, K. Rohr, Z. Nawrat: *Robin Heart PortVisionAble - idea, design and preliminary testing results*, *Proceedings of the 10th International Workshop on Robot Motion and Control*, Poznań 2015, s. 176–181.
- [12] Y. Noh, S. Sareh, J. Back, A.W. Helge, T. Ranzani, E.L. Secco, A. Faragasso, H. Liu, K. Althoefer: *A three-axial body force sensor for flexible manipulators*, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics & Automation (ICRA)*, 2014, s. 6388–6393
- [13] Z. Nawrat: *Robotyka medyczna w Polsce*, *Medical Robotics Reports*, vol. 1, 2012, s. 7–16.
- [14] KroczeK K. , *Rynek robotów medycznych*, *Medical Robotics Reports*. Nr 4, 2015, s. 61-64.
- [15] Z. Nawrat, K. Rohr, P. Fürjes, Ł. Mucha, K. Lis, J. Radó, C. Dücső, P. Földesy, W. Sadowski, D. Krawczyk, P. KroczeK, G. Szabényi, P. Soósd, Z. Małota: *Force Feedback Control System Dedicated for Robin Heart Surgical Robot*, *30th EuroSensors Conference EUROSENSORS 2016*.
- [16] Z. Nawrat, K. Lis, K. Rohr, Ł. Mucha: *Manipulator of a medical device*, *Patent USA*, US 20160059409 A1, 2016.
- [17] J. Fraś, S. Tabaka, J. Czarnowski: *Visual Marker Based Shape Recognition System for Continuum Manipulators*, *Challenges in Automation, Robotics and Measurement Techniques 2016*, DOI: 10.1007/978-3-319-29357-8_39.
- [18] J. Radó, C. Dücső, G. Battistig, G. Szabényi, P. Fürjes, Z. Nawrat, K. Rohr: *3D force sensors for laparoscopic surgery*

- tool*, Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP), 2016.
- [19] B. Gonenc, J. Handa, P. Gehlbach, R.H. Taylor, I. Iordachita: *Design of 3-DOF Force Sensing Micro-Forceps for Robot Assisted Vitreoretinal Surgery*, Conference Proceedings IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2013, s. 5686–5689.
- [20] Z. Nawrat, K. Rohr, P. Fürjes, L. Mucha, K. Lis, J. Radó, C. Dücső, P. Földesy, W. Sadowski, D. Krawczyk, P. Kroczek, G. Szabényi, 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.
- [21] T. Kárpáti, A.E. Pap, G. Radnóczy, B. Beke, I. Bársony, P. Fürjes: *Reliable aluminum contact formation by electrostatic bonding*, Journal of Micromechanics and Microengineering, vol. 25(7), 2015.
- [22] R. Bidar, J. Brisset, F. Gosselin: *Design of a high-fidelity haptic device for telesurgery*, Proceedings of IEEE ICRA 2005, Spain 2005, s. 205–210.
- [23] E.U. Braun, H. Mayer, A. Knoll, R. Lange, R. Bauernschmitt: *The must-have in robotic heart surgery: haptic feedback*, s. 9–21, [w:] *Medical Robotics*, V. Bozovic (red.), I-Tech Education and Publishing, Vienna 2008.

otrzymano / submitted: 25.11.2016
zaakceptowano / accepted: 16.11.2016