

Robot chirurgiczny Robin Heart Tele – następca Robin Heart mc²

Artykuł recenzowany

Streszczenie

W artykule opisano innowacyjną koncepcję platformy narzędziowej umożliwiającej operowanie za pomocą jednego ramienia robota pozycjonującego. W 2009 r. podczas testu in vivo modelu zwierzęcego operacji pomostowania wieńcowego udowodniono przydatność zupełnie nowej koncepcji robota modułowego nazywanego Robin Heart mc². To największy do tej pory robot z rodziny Robin Heart – sterowany przez jednego operatora – zastępuje trzy osoby przy stole operacyjnym: chirurga asystującego (dwa narzędzia), operator toru wizyjnego (endoskop) oraz głównego chirurga (dwa narzędzia chirurgiczne). Po raz pierwszy wprowadzono w nim platformę narzędziową – de facto pełnego mini robota chirurgicznego – zamontowanego na jednym ramieniu robota. Zaprezentowany robot nowej generacji rozwija tę koncepcję wprowadzając oryginalne rozwiązania konstrukcyjne zwiększające możliwości funkcjonalne.

Abstract

This article describes an innovative concept of a tool platform that allows to operate with one arm of a positioning robot. In 2009, during the in vivo animal model of coronary artery bypass surgery, a completely new concept of a modular robot named Robin Heart mc² was demonstrated and its usefulness proven. This is the largest Robin Heart robot, operated by one operator, replacing three people at the operating table: assistant surgeon (two tools), endoscope operator and primary surgeon (two surgical instruments). For the first time a tool platform has been introduced – de facto a full mini surgical robot – mounted on one robot arm. The next-generation robot presented here develops this concept by introducing original design solutions that enhance functionality

ZBIGNIEW NAWRAT¹,
ŁUKASZ MUCHA¹,
KRZYSZTOF LIS^{1,2},
KRZYSZTOF LEHRICH²,
KAMIL ROHR¹,
PAWEŁ KOSTKA^{1,2}

¹ Fundacja Rozwoju Kardiochirurgii
im. prof. Zbigniewa Religi, Zabrze
² Politechnika Śląska, Gliwice

Słowa kluczowe:
roboty medyczne,
roboty chirurgiczne,
chirurgia robotowa

Key words:
medical robots,
surgical robots,
robotic surgery

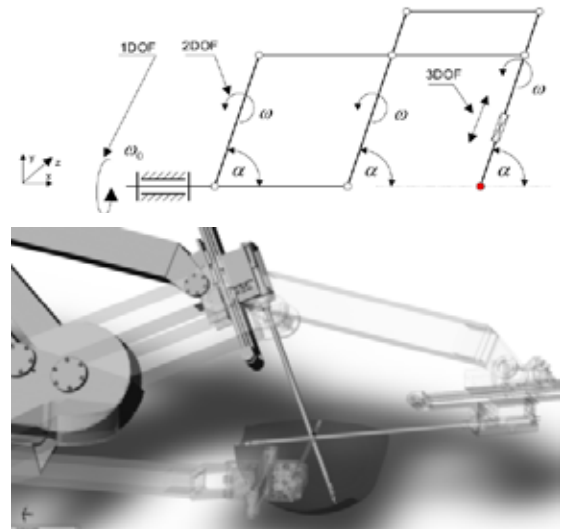
■ WSTĘP

Genezą powstania projektu robota Robin Heart (RiH) była potrzeba wprowadzenia w pełni funkcjonalnego narzędzia do małoinwazyjnych operacji na sercu. Rodzina manipulatorów Robin Heart powstała w Fundacji Rozwoju Kardiologii im. Prof. Zbigniewa Religi w Zabrze w współpracy ze specjalistami z kilku ośrodków akademickich i przedsiębiorstw. W ramach rodziny polskich robotów Robin Heart w pierwszym okresie, w latach 2000-2003, powstały trzy modele: **Robin Heart 0**, **Robin Heart 1** i **Robin Heart 2**, różniące się m.in. koncepcją sterowania i mocowania. W latach 2007-2008 powstał służący do sterowania położeniem endoskopowego toru wizyjnego robot **Robin Heart Vision**. **Robin Heart mc²** powstał w 2009 roku w odpowiedzi na potrzeby precyzyjnego działania w małym obszarze pola operacji. Sterowanie robotem odbywa się w ergonomicznej konsoli **Robin Heart Shell**. Wprowadzono także oryginalne narzędzia mechatroniczne systemu **Robin Heart Uni**, które można mocować na ramieniu robota lub w specjalnym uchwycie ręcznym [1, 2]. W kolejnych latach (2011-2016) powstał robot toru wizyjnego **Robin Heart PortVisionAble** [3] **Pelikan** [4] i **Robin Heart Tele**. Robin Heart PVA – jako pierwszy – przygotowywany jest do wdrożenia klinicznego w 2017 r.

Projekt zainicjował i prowadzi Zbigniew Nawrat. Projekty były finansowane z kilku grantów Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego, z funduszy własnych FRK oraz przez sponsorów. Kierownikiem pierwszego grantu był prof. Zbigniew Religa, który był wielkim orędownikiem tej nowej technologii operacyjnej. Za prace projektowe i konstrukcyjne odpowiednio odpowiadali, w latach 2000-2009: mechanika – zespół prowadzony przez Leszka Podsekdowskiego [5] (Robin Heart 0, 1), Krzysztofa Mianowskiego (Robin Heart 2), Marka Ciembroniewicza (Robin Heart mc²) – oprogramowanie wykonał Paweł Kostka; następne modele powstały w zespole: mechanicy Krzysztof Lis, Krzysztof Lechrich, Łukasz Mucha (Robin Heart PVA0, Robin Heart PVA1, Robin Heart Pelikan, Robin Heart Tele), elektronika i oprogramowanie pod kierunkiem Kamila Rohra. Duże zainteresowanie robotem Robin Heart, stymulowane również organizowanymi cyklicznie konferencjami w Zabrze oraz licznymi publikacjami, spowodowało gwałtowny rozwój nowej dziedziny – robotyki medycznej – w wielu ośrodkach akademickich w Polsce.

Robot kardiologiczny jest manipulatorem kopiującym, telemanipulatorem, który składa się z dwóch lub więcej ramion narzędziowych i jednego trzymającego kamerę oraz układu zadawania ruchu wraz z układem sterowania. Operator wykonuje różne zadania, sterując ruchem końcówki roboczej narzędzia przymocowanego do ramienia. Realizacja

mechanicznie ustalonej stałopunktowości robota jest osiągana kinematycznie za pomocą mechanizmu równoległowodowego typu RCM (*Remote Center of Motion*) – rys. 1. Projektowanie robotów poprzedzały studia literaturowe oraz badania własne związane z wymaganiami funkcjonalnymi narzędzi podczas wykonywania elementów zabiegu chirurgicznego na tkankach miękkich. Model kinematyki robota Robin Heart przedstawiono w pracach [6, 7].



Rysunek 1. Mechanizm równoległowodowy typu RCM (*Remote Center of Motion*) wykorzystany w konstrukcji robotów Robin Heart

■ STAN TECHNIKI

Operowanie narzędziami prostymi, których długość ma kilkadziesiąt centymetrów polega na wprowadzeniu ich na określoną głębokość w ciele pacjenta i orientowanie poprzez zmianę kąta wprowadzania w punkt stały robota, którym jest miejsce przecięcia powłok ciała pacjenta. Stosowane do tej pory w chirurgii telemanipulatory mają pojedyncze ramię lub zespół ramion, z których każde wyposażone jest tylko w jedno narzędzie. Jeśli chirurg potrzebuje innego narzędzia niż narzędzia zamocowanego na danym ramieniu – asystent wymienia narzędzie, montując nowe do ramienia. W rozwiązaniach tych mocowanie zarówno pojedynczych narzędzi jak i toru wizyjnego na niezależnych osobnych ramionach powoduje ograniczenie pola manewrowego dla poszczególnych ramion i możliwość wystąpienia kolizji podczas przemieszczania narzędzia w polu operacyjnym. Kolejnym problemem jaki wynika z takiego rozwiązania jest ograniczenie dostępu chirurga i aparatury medycznej do pacjenta. Systemy robotyczne powinny umożliwić przejście instrumentów przez wspólny trokar lub rozmieszczenie narzędzi w oddalonych od siebie punktach na ciele pacjenta. Usytuowanie narzędzi blisko siebie powoduje

zmniejszenie przestrzeni manipulacyjnej ramion, oraz ograniczenie możliwości ruchowych samego narzędzia w polu operacyjnym.

Omówione w artykule rozwiązania techniczne są wynikiem dążenia do rozwiązania, które zapewni możliwość operowania kilkoma narzędziami przy wyeliminowaniu kolizyjności ramion telemanipulatora z możliwością 1) wstępnego rozmieszczenia narzędzi i toru wizyjnego w punktach stałych niezależnie od ich orientacji względem siebie, 2) zwiększenia zakresu pracy dla danego narzędzia, 3) zachowania mechanicznej stałopunktowości narzędzi podczas pracy, 4) zachowania minimalnej zajmowanej przestrzeni przez mechanizmy nastawne w polu operacyjnym, 5) uzyskania małej masy samego przyrządu medycznego.

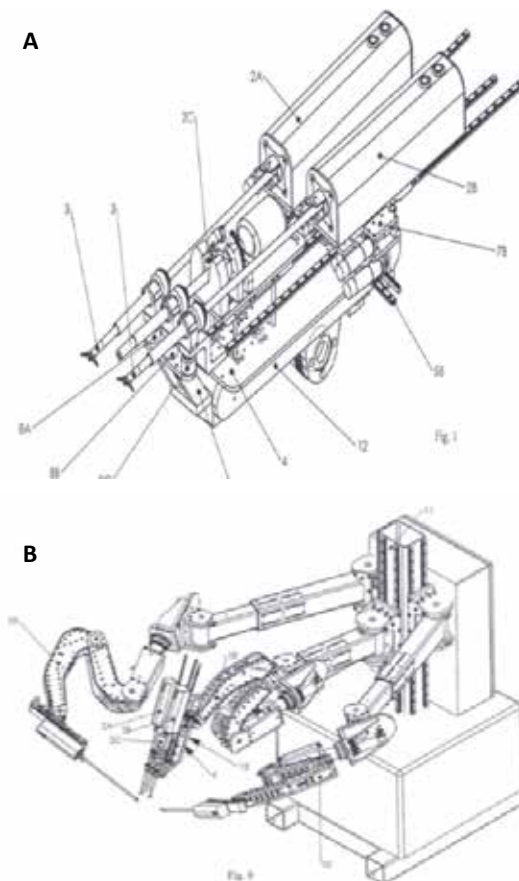
■ ROBIN HEART mc^2

Robin Heart (RiH) mc^2 jest oryginalną próbą rozwiązania opisywanych problemów – pierwszym modułowym, multizestawnym robotem chirurgicznym. Zastosowano strukturę układu ramion 2 + 1, gdzie dwa zewnętrzne ramiona są ramionami narzędziowymi, a środkowe ramię wyposażone jest w platformę, na której mogą pracować dwa narzędzia robocze typu RiH Uni System oraz tor wizyjny. Nowy model robota był odpowiedzią na wnioski dotyczące funkcjonalności przyjętych rozwiązań modeli robotów RiH 1, 2, 3 oraz Vision zweryfikowanych podczas pierwszych eksperymentów na zwierzętach. Problemy dotyczące kolizyjności pracy ramion robota, szczególnie w warunkach blisko siebie osadzonych (np. podczas pobierania tętnicy piersiowej) narzędzi zainspirowały do zmiany koncepcji przestrzennej, funkcjonalnej i konstrukcyjnej robota [1].

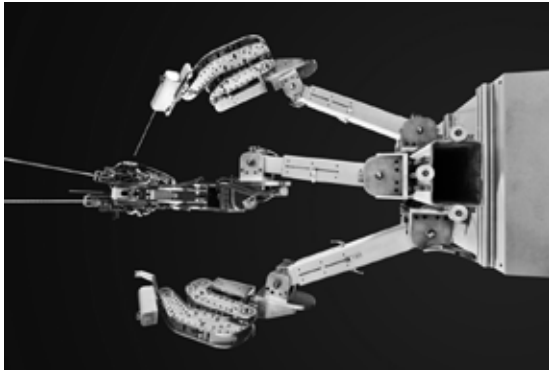
Telemanipulatory stosowane dotychczas w chirurgii mają ramiona, z których każde wyposażone jest tylko w jedno narzędzie. Celem wynalazku [8] było opracowanie rozwiązania, które zapewni możliwość operowania kilkoma narzędziami przy wyeliminowaniu kolizyjności ramion telemanipulatora. Przyrząd (platforma narzędziowa) do wykonywania zabiegów medycznych według zgłoszenia został przedstawiony na rys. 2. Przyrząd zawiera trzy narzędzia: dwa zaopatrzone są w chirurgiczne końcówki robocze, trzecie – zlokalizowane pomiędzy narzędziami 2A i 2B – zakończone jest kamerą endoskopową. Narzędzia osadzone są na wspólnej konstrukcji wsporczej i przyporzędkowanych indywidualnie przewodnicach zespołów trakcyjnych. Przewodnice, po których poruszają się narzędzia zawierają listwy zębate, a napęd zespołów trakcyjnych jest realizowany przez koła zębate i silniki bezszczotkowe firmy Maxon. Platforma może być zamocowana na wózku jezdnym osadzonym na szynie zamocowanej przegubowo na końcu ramienia telemanipulatora chirurgicznego. Na rys.

2B przedstawiono schematycznie telemanipulator do wykonywania zabiegów medycznych, który zawiera trzy przegubowe i przesuwne ramiona. Dwa skrajne ramiona telemanipulatora wyposażone są w narzędzia robocze, środkowe ramię posiada opisaną platformę narzędziową, zamocowaną na wózku jezdnym osadzonym na szynie zamocowanej przegubowo na końcu tego ramienia – rys. 3 [1].

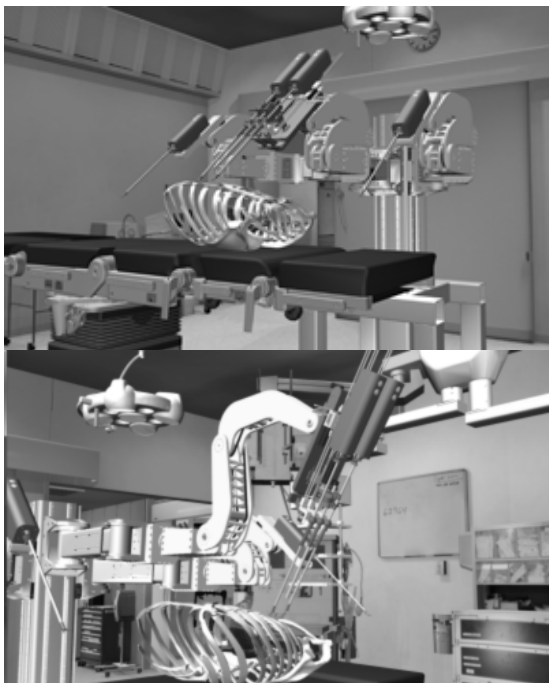
Na rys. 4 w przestrzeni wirtualnej pokazano trzy możliwe konfiguracje sprzętowo robota: jedno ramię z platformą narzędziową (2 narzędzia + endoskop, symbolicznie [2 + 1]), klasyczny zestaw trzech ramion (2 narzędziowe + środkowe z endoskopem, symbolicznie [2 + 1]), oraz układ trzech ramion z platformą na ramieniu środkowym (2 + [2 + 1]). Układ napędzany jest silnikami bezszczotkowymi firmy Maxon o różnej mocy. Pierwszy stopień swobody – obrót wokół pierwszej osi realizowany jest przez przekładnię z pasem zębatym, drugi stopień swobody – przez przekładnię falową i kolejne przeguby równoległowodów są sprzęgnięte łańcuchem [1].



Rysunek 2. Schematy konstrukcyjne platformy narzędziowej (A) i robota Robin Heart mc^2 (B) [8]



Rysunek 3. Robin Heart mc²



Rysunek 4. Robin Heart mc² w wirtualnej sali operacyjnej zestawie 3 x 1 (klasyczne ustawienie narzędzie-obrazowód-narzędzie), platforma narzędziowa na jednym ramieniu oraz układ 2+(2+1) [narzędzie-platforma (dwa narzędzia i obrazowód)-narzędzie]

W 2009 roku wykonano testy robota na zwierzętach, które potwierdziły słuszność przyjętych założeń – rys. 5 [9].

Robin Heart mc² jest uniwersalnym robotem modułowym, narzędzia można szybko zdemontować z ramienia robota i sterować nimi ze specjalnego uchwytu w dłoni. Prototyp jest udoskonalany i kolejne rozwiązanie platformy narzędziowej zostało wprowadzone do modelu Robin Heart Tele.

■ ROBIN HEART TELE

Robot Robin Heart Tele był wykonany w Fundacji Rozwoju Kardiochirurgii im. prof. Zbigniewa Religi w ramach projektu „TeleRobinSurgery – opracowa-



Rysunek 5. Przeprowadzone testy robota Robin Heart mc² w Centrum Medycyny Doświadczalnej Śląskiego Uniwersytetu Medycznego potwierdziły funkcjonalność przyjętych rozwiązań technicznych

nie i badania nowych rozwiązań technicznych dla zdalnie sterowanych operacji chirurgicznych za pomocą robotów Robin Heart”. PBS1/A3/2/2012 kierowanego przez dr inż. Pawła Kostkę. Projekt, wykona-

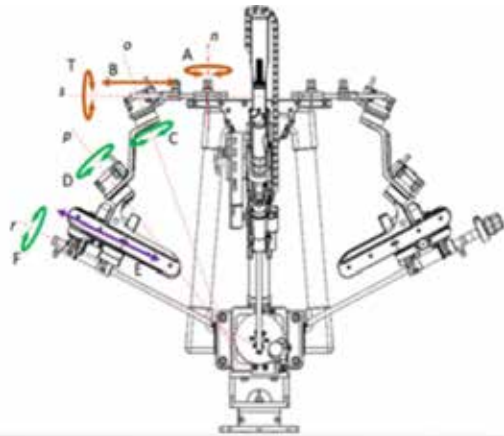
nie, wdrożenie robota było realizowane przez zespół RobinHeartTeam Pracowni Biocybernetyki FRK kierowany przez Zbigniewa Nawrata, za część mechaniczną odpowiadali Krzysztof Lis, Krzysztof Lechrich, Łukasz Mucha [10].

Robin Heart Tele to innowacyjny telemanipulator pracujący w systemie nadążnym Master-Slave, z konstrukcją z materiałów lekkich, zautomatyzowaną mikro-platformą dwóch narzędzi wykonawczych i toru wizyjnego wraz z rozproszonym systemem sterowania z dodatkowym torem pomiarowym dla badań opóźnień, precyzji i warunków bezpieczeństwa podczas zdalnych tele-manipulacji na duże i małe odległości.

Platforma odwzorowująca pełny system 2+1 (2 narzędzia + tor kamery obrazowej) do zrobotyzowanej operacji jest zakładana na główne ramię telemanipulatora zamiennie z pojedynczym narzędziem lub częścią optyczną toru wizyjnego – rys. 6. Na wstępnym etapie projektu przeprowadzono szerokie studia projektowe, spośród których kilka zakończonych projektem CAD zostało porównanych, biorąc pod uwagę m.in. zakres pracy i zasięg mikroramion, wagę platformy, użyte mikronapędy. Jako efekt optymalizacji powstał projekt i wykonany został prototyp platformy złożonej z trzech ramion o 4 stopniach swobody.

Zasadniczą zaletą wynalazku [10] jest znaczne zwiększenie funkcjonalności pojedynczego ramienia wsporczego robota chirurgicznego z jednoczesnym wyeliminowaniem wzajemnej kolizyjności zespołu ramion narzędziowych. Zapewniając zwiększenie funkcjonalności pojedynczego ramienia robota chirurgicznego oraz eliminując kolizyjność zachowano małą wagę całego zespołu ramion narzędziowych oraz dodatkowo zapewniono duży zakres ruchu każdego ramienia narzędziowego oraz zamocowanych na nich instrumentów chirurgicznych.

Przedmiotem wynalazku jest przyrząd medyczny dedykowany dla pojedynczego ramienia robota, zwiększający jego funkcjonalność: o możliwość stosowania większej ilości narzędzi w tym samym czasie, narzędzia mocowane są bezpośrednio na przyrządzie. Zwiększony zostaje zakres ruchu – pracy dla każdego narzędzia, oraz możliwość wstępnego usytuowania-ustawienia narzędzia – położenia punktu stałego na ciele pacjenta dla każdego z narzędzi indywidualnie bez konieczności zmiany położenia robota względem pacjenta (z zachowaniem mechanicznego zabezpieczenia stałopunktowości narzędzi i toru wizyjnego w trakcie zabiegu). Jest to przyrząd do wykonywania zabiegów medycznych w szczególności do wykonywania małoinwazyjnych zabiegów chirurgicznych oraz innych zabiegów medycznych za pomocą narzędzi wsuwanych przez naturalne lub specjalnie wykonywane otwory w powłokach ciała

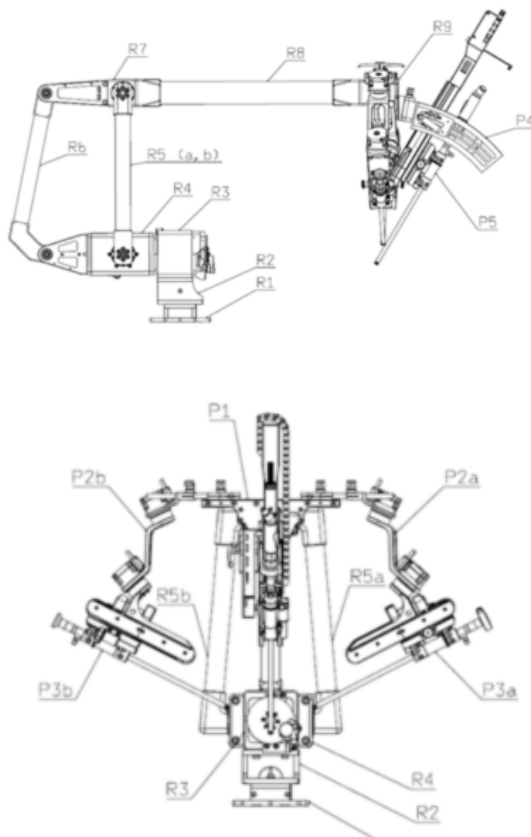


Rysunek 6. Projekt i prototyp mechatronicznej platformy 2+1 (2 narzędzia + optyka toru wizyjnego). To stałopunktowy robot chirurgiczny o zwiększonej sztywności pracy przeznaczony do manewrowania/trzymania toru wizyjnego wraz z co najmniej jednym narzędziem z możliwością wstępnego ustawienia punktów pracy dla wymienionych instrumentów chirurgicznych mocowanych na pojedynczym ramieniu robota. Robot ten charakteryzuje się możliwością wstępnego ustawienia w polu operacyjnym niezależnie od siebie narzędzi znajdujących się na jego ramieniu jak i samego robota względem stołu [10]

pacjenta, oraz innych zabiegów medycznych wymagających znacznej precyzji i telemanipulacji, czyli sterowania na odległość funkcjami wykonawczymi narzędzi. Przyrząd dedykowany jest dla dwóch narzędzi oraz toru wizyjnego. Może być stosowany dla większej ilości narzędzi mocowanych na podstawie platformy. Tor wizyjny może zostać zastąpiony przez narzędzie w przypadku zabiegów gdzie nie jest on wymagany lub stosowany naprzemiennie z narzędziem na ramieniu narzędziowym.

Robot przedstawiony na rys. 7 zbudowany jest z podstawy mocującej R1 do której mocowana jest platforma obrotowa R2 na której osadzony jest kor-

pus nieruchomy wraz z napędem R3. Do wału silnika napędowego utwierdzony jest korpus kątowno-wychylny R4 wraz z jednostką napędową. Do wału silnika mocowane są nogi R5a oraz R5b, natomiast do korpusu R4 mocowana jest obrotowo noga R6. Nogi R5a, R5b, oraz R6 mocowane są obrotowo w korpusie górnym R7. Do korpusu mocowana jest także nieruchomo korpus prowadzący R8 wewnątrz którego znajdują się mechanizmy napędowe połączone z mechanizmem obrotowym R9. Na mechanizmie obrotowym R9 mocowana jest podstawa platformy P1, na której znajdują się mechanizmy ramion narzędziowych P2a oraz P2b, wraz z narzędziami P3a oraz P3b. Na platformie P1 mocowany jest także mechanizm toru wizyjnego P4 wraz z kamerą P5 [10].



Rysunek 7. Schemat konstrukcji Robin Heart Tele [10]

Zespół ramion narzędziowych zawiera trzy ruchome ramiona narzędziowe (P4, P2a, P2b) osadzone na podstawie (P1) przeznaczonej do jej rozłącznego mocowania na ramieniu wsporczym robota chirurgicznego. Robot obecnie jest testowany wraz z konsolą Robin Stiff Flop – rys. 8. System sterowania jest opisany w artykule Dariusza Krawczyka i Piotra Krocza w tym samym numerze Medical Robots Reports 2016.



Rysunek 8. Robin Heart Tele podczas testów w Pracowni Biocybernetyki IPS FRK

■ PODSUMOWANIE

Fundacja Rozwoju Kardiochirurgii im. prof. Zbigniewa Religi prowadzi konsekwentnie prace nad robotem chirurgicznym Robin Heart. Pierwszy z robotów – Robin Heart PortVisionAble – jednoramienny robot toru wizyjnego zastępujący jednego asystenta przy stole operacyjnym w 2017 r. zostanie poddany testom klinicznym. Pierwszą operację z jego użyciem – operację zastawki mitralnej – przeprowadzi Grzegorz Religa.

W ramach rozwoju telemanipulatorów chirurgicznych opracowano nowatorską koncepcję ro-

bota modułowego, multizestawnego z platformą narzędziową i możliwością mocowania narzędzi mechatronicznych również w uchwycie ręcznym. W 2009 r. innowacyjna koncepcja zrealizowana w modelu Robin Heart mc² została przetestowana w eksperymencie na zwierzęciu i pozytywnie zwerfikowana przez kardiochirurgów. Obecnie prowadzone są testy laboratoryjne nowej generacji robota, który nazwano Robin Heart Tele. Wprowadzono w nim zupełnie nowe technologie materiałowe i rozwiązania konstrukcyjne opisane w artykule. Uzyskany zakres ruchu narzędzi pozwala na wykonywanie operacji na tkankach miękkich w przestrzeni klatki piersiowej i brzucha. Szczególne nasze zainteresowanie jako twórców robota jest zwrócone w stronę zabiegów kardiochirurgicznych (gdzie obecnie stosowane robot – da Vinci – nie uzyskał pełnej akceptacji) i urologicznych (gdzie uzyskano znaczące postępy i upowszechnienie w zakresie stosowania robotów chirurgicznych). Jesteśmy przekonani, że rozwój robotyki chirurgicznej wymaga wprowadzenia innowacyjnych rozwiązań, nowych robotów o cechach niedostępnych w oferowanych na rynku dzisiaj produktów. Tworzymy kolejne argumenty wskazujące, że Robin Heart stanie się poszukiwanym, bezpiecznym i korzystnym, dla lekarza i jego pacjenta rozwiązaniem.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Nawrat Z., Robot chirurgiczny Robin Heart – projekty, prototypy, badania, perspektywy. Rozprawa habilitacyjna 24/2011. Śląski Uniwersytet Medyczny w Katowicach, Katowice 2011.
- [2] Nawrat Z., The Robin Heart story. Medical Robotics Reports, volume 1, 2012, 19-21
- [3] Krzysztof Lis, Krzysztof Lehrich, Łukasz Mucha, Kamil Rohr, Zbigniew Nawrat, Robin Heart PortVisionAble – projekt, konstrukcja i wstępne badania. Medical Robotics Reports, volume 3, 2014, 6-22
- [4] Patent PL 208 988 – „Manipulator medyczny” – Twórcy Zbigniew Nawrat, Leszek Podseńkowski, zgłoszenie 03.11.2003, udzielenie patentu 16.11.2010r. Wnioskodawca: Fundacja Rozwoju Kardiochirurgii
- [5] Krzysztof Lis, Krzysztof Lehrich, Łukasz Mucha, Zbigniew 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, 154-159
- [6] Nawrat Z.: Roboty i manipulatory w medycynie. Mechanika Techniczna. Tom 12. Biomechanika. Red. R. Będziński. Warszawa: IPPT PAN 2011, 753-827.
- [7] Podseńkowski L.: Forward and inverse kinematics of the cardio-surgical robot with non-coincident axis of the wrist. SyRoCo 2003, 525-530
- [8] Nawrat Z., Robot Robin Heart 2010 – raport z prac badawczych. Kardiochirurgia i Torakochirurgia Polska. Marzec 2011, tom 8, numer 1, 126-135.
- [9] Patent PL 217 349. Przyrząd do wykonywania zabiegów medycznych oraz telemanipulator do wykonywania zabiegów medycznych. Twórcy: Z. Nawrat, M. Ciembroniewicz. Zgłoszenie 08.09.2010; udzielenie patentu 25.10.2013 r. Wnioskodawca: Fundacja Rozwoju Kardiochirurgii
- [10] Patent A surgical robot's tool arms assembly EP 3146930 A1 22.09.2015 Twórcy Z. Nawrat, K. Lis, K. Lehrich, Ł. Mucha, K. Rohr. Wnioskodawca: Fundacja Rozwoju Kardiochirurgii

PODZIEKOWANIA

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 Kardiochirurgii i wielu sponsorów. The project supported in part by the European Commission within the 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.