



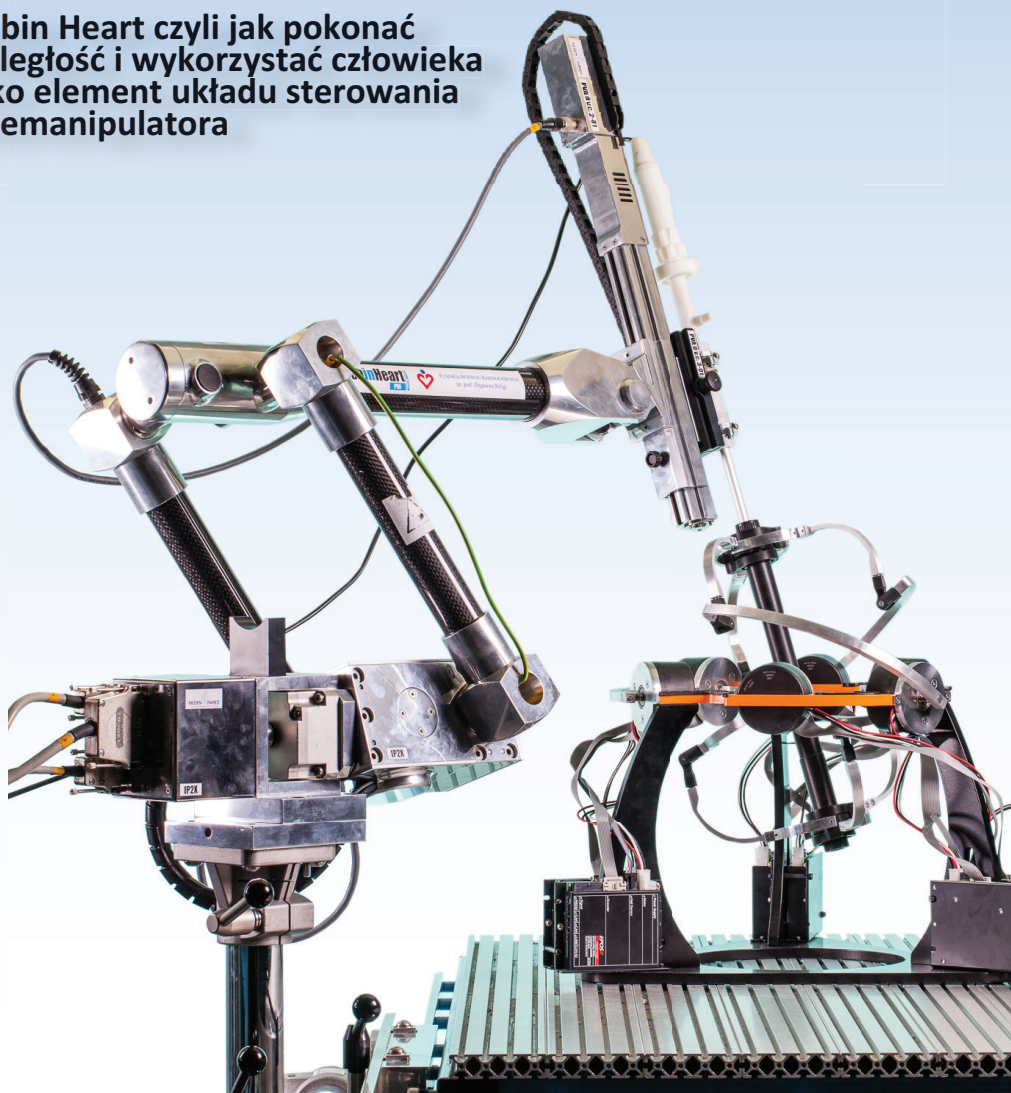
Medical Robotics Reports

www.medicalroboticsreports.eu



Digital Innovation Hub
in Healthcare Robotics

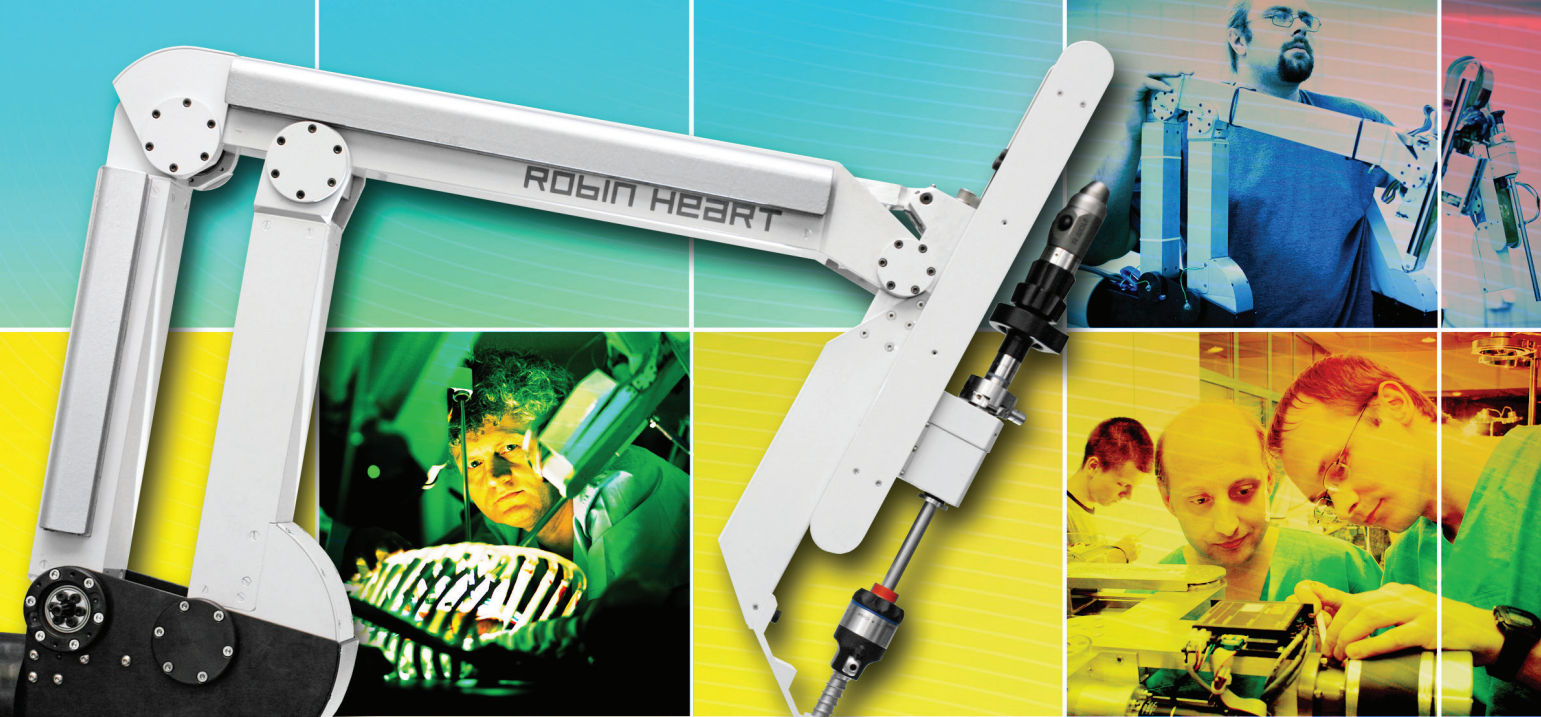
- Anterior Approach for Determination of Sagittal Spinopelvic Parameters using Anterior Pelvic Plane and Sternum Plane
- Algorytmy sterowania admitancyjnego i impedancyjnego w robotach medycznych
- Zastosowanie egzoszkieleatów w rehabilitacji ruchowej u pacjentów ze stwardnieniem rozsianym
- Robin Heart czyli jak pokonać odległość i wykorzystać człowieka jako element układu sterowania telemanipulatora



Official Journal of ISMR

International Society
for Medical Robotics

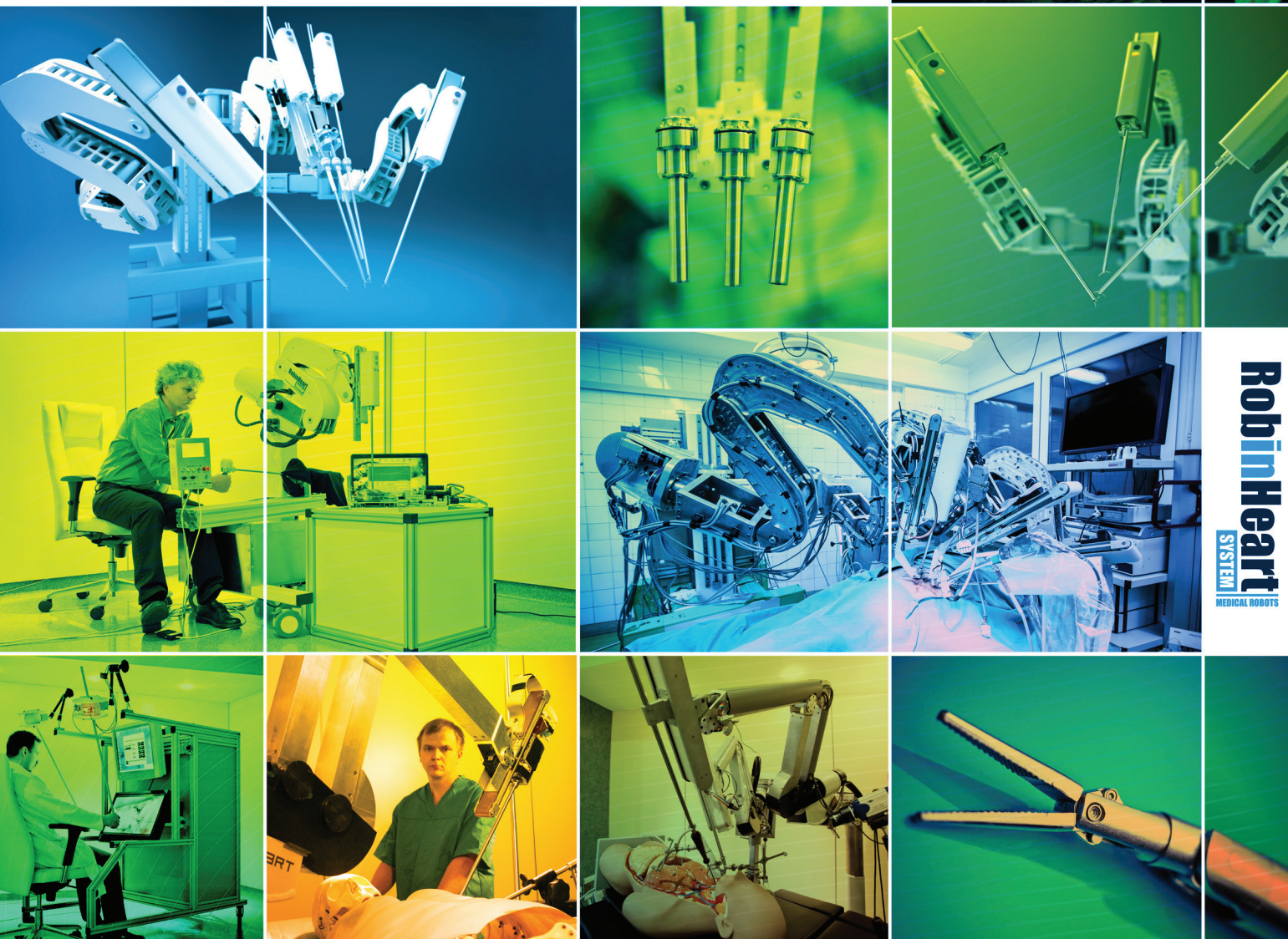




RobinHeart

SYSTEM

MEDICAL ROBOTS



RobinHeart
SYSTEM
MEDICAL ROBOTS



foto: Rafał Masłowski

Drogi Czytelniku, czyli Roboty kontra COVID-19

Oddajemy do Twoich rąk nowe wydanie naszego czasopisma datowane jako rocznik 2019, ale realne wydanie przenieśliśmy na początek roku 2020 i trudno nie zmodyfikować słowa wstępnego z powodu pandemii oraz wynikających z niego wniosków.

Po pierwsze: że **jesteśmy ze sobą powiązani**. Wirus który znalazł się organizmie Chińczyka tysiące kilometrów od nas już za kilkanaście dni jest na sąsiedniej ulicy. Wszystkie zagrożenia są wspólne. Dlatego wspólnie i odpowiedzialnie musimy podejmować decyzje i określone działania.

Po drugie: **nauka i kompetencja**. Potrzebujemy fachowców. Ludzi którzy mogą w sytuacjach kryzysowych wskazać drogę, uzasadnić, podjąć wyzwanie naukowe, inżynierskie i... potrzebujemy właściwej komunikacji. Bo wszyscy powinniśmy zrozumieć co się dzieje i dlaczego, skoro jesteśmy głównymi aktorami tego przedsięwzięcia.

Po trzecie: **technologia**. Jeśli, tak jak w przypadku CoVid, gdy okazuje się, że zagrożeniem jest bliskość drugiego człowieka, specjalnego znaczenia nabierają technologie pokonujące dystans. Technologie komunikacji na odległość stanowią realną pomoc w organizacji pracy, współpracy, utrzymaniu jakości życia i oczywiście ratowaniu życia. Generalnie medycyna bez technologii jest bezradna. Po okresie rozwoju telemedycyny czyli przesyłania na odległość informacji, obrazów, decyzji czas na przesyłanie na odległość działania. Do tego niezbędne są roboty.

Powraca czas inżynierów. To oni przecież stworzyli podwaliny cywilizacji przemysłowej, której jesteśmy beneficjentami. I oni stanowią dziś szansę na dokonanie przełomowych wynalazków, rozwiązanie powstałych dylematów i trudności. Fakt, że bliska relacja z drugim człowiekiem stwarza ryzyko – zapamiętamy jako motto roku 2020 – *trzymaj dystans*. W tym zakresie potrzeba oddalenia, zamknięcia, ochrony przed bezpośrednim spotkaniem z drugim człowiekiem tworzy potrzebę zweryfikowania sposobu wykonywania usług zdrowotnych i leczenia pacjentów. Tu częściowym rozwiązaniem jest telemedycyna oraz roboty w specjalnościach zabiegowych, bo to one pozwalają na efektywne działanie na odległość

Wprowadzenie procedury odizolowania każdego kto miał kontakt z osobą zarażoną wirusem SARS-CoV-2 spowodowało reakcję kaskadową w służbie zdrowia: znikają kolejne przychodnie, oddziały, szpitale. Brakuje rąk do pracy. Roboty medyczne to nie tylko diagnostyka, rehabilitacja i terapia. To nie tylko da Vinci wykorzystywany w skomplikowanych zabiegach operacyjnych. Roboty wykorzystywane są z powodzeniem do przygotowywania leków spersonalizowanych, logistyce medycznej i pielęgniarstwa, gdzie pomagają personelowi, wykonując proste zadania, np. transportowe czy dezynfekcję pomieszczeń. Obecnie głównymi graczami na światowym rynku robotów medycznych są firmy: Intuitive Surgical, Inc. (USA), Stryker Corporation (USA), Mazor Robotics Ltd. (Izrael), Hocoma AG (Szwajcaria), Hansen Medi-

cal Inc. (USA), Accuray Incorporated (USA), Omnicell, Inc. (USA), Ekso Bionics Holdings, Inc. (USA), ARxIUM (USA) i Kirby Lester LLC (US), Houston Medical Robotics (USA), Otto Bock Healthcare, Kinova robotics, Varian Medical Systems, Hocoma AG, Vecna Robotics, Globus Medical, IRobot Corporation, Titan Medical, Inc, KB Medical S.A.

W Polsce: a) roboty chirurgiczne: Fundacja Rozwoju Kardiochirurgii im. prof. Zbigniewa Religi (Robin Heart chirurgiczny), ACCREA Engineering Poland (treningowy robot); b) roboty rehabilitacyjne: Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Techniki i Aparatury Medycznej ITAM, Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP, PRODromus (ProdRobot zautomatyzowany trener chodu), MiDmed (projekty tworzenia robotów do rehabilitacji poudarowej i onkologicznej) w tym firmy oferujące komercyjne roboty rehabilitacyjne i prowadzące oryginalne prace badawcze: EGZOTECH, PHU Technomex, Meden-Inmed; c) roboty diagnostyczne: Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Techniki i Aparatury Medycznej ITAM z Politechniką Śląską; ACCREA Engineering Poland (tele-USG); d) robotyczna apteka, która przygotowuje dawki leków w indywidualnych zestawach dla pacjentów szpitalnych: UniDoseOne Quizit (zautomatyzowane systemy wydające leki dla pacjentów szpitalnych); e) roboty opiekuńcze, socjalne: ACCREA Engineering Poland, AssisTech, HealthUp, Politechnika Śląska z APA sp. z o.o.; f) roboty dezynfekcyjne: ACCREA Engineering Poland; g) sztuczne narządy: vBionic (drukowana sztuczna ręka/dłoń); Fundacja Rozwoju Kardiochirurgii im. prof. Zbigniewa Religi (sztuczne serce i systemy wspomaganie krążenia Religa Heart).

W Europie tworzy się szansę dla małych i większych przedsiębiorców np. wspierając projektami przez huby takie jak Digital Innovation Hub Healthcare Robotics HERO. Sprawnie przegrupowuje środki na nowe cele takie jak wsparcie rozwiązań bezpośrednio związanych ze zmniejszeniem skutków, kryzysu, rozszerzania się epidemii.

Oddajemy Tobie, Czytelniku, kolejne ciekawe wydanie czasopisma robotyków i lekarzy, pacjentów i administratorów usług medycznych, wynalazców i humanistów. Znajdziecie tu przykład szpitala, który sobie świetnie radzi w każdej sytuacji i zaczyna wskazywać na nowe standardy zarządzania i usług medycznych, pionierów chirurgii robotowej, naukowców i inżynierów pokonujących kolejne bariery technologiczne i wskazujących kierunki rozwoju robotów w służbie pacjenta. Jest też krótki raport o postępach projektu europejskiego wspierającego przedsiębiorstwa ukierunkowane na rynek robotów medycznych – **DIH Healthcare Robotics HERO**.

Proces zmian zaczął się już wcześniej, ale pandemia odkryła słabości systemowe pracy opartej tylko na bezpośrednich **usługach lekarz-pacjent**. Zachodzące zmiany demograficzne, brak właściwej liczby personelu medycznego i konieczność podnoszenia standardów wykonywanych usług w szpitalach, przychodniach i domach pomocy społecznej, to trendy światowe, które wymuszają większe zaangażowanie w dziedzinę robotyki medycznej, a w tym w rozwój sztucznej inteligencji. Przechodzimy od systemu **lekarz-pacjent** do systemu **lekarz-technologia-pacjent**. Jesteśmy coraz bardziej przygotowani do ostatniej fazy: **technologia-pacjent**. To roboty już dzisiaj pozwalają być nam „bardziej ludźmi” odciążając nas od obowiązków żmudnych i ryzykownych prac a niedługo roboty uratują przyszłość człowieka.

Dlatego, moi drodzy, współpracujmy, bo tylko wspólnie możemy rozwiązać problemy naszego domu, naszej ulicy, wioski czy miasta. Bo to w naszym domu zaczyna albo kończy się świat. Każdy nasz ruch, każdego z nas, jest ważny. Z powodu Ciebie świat może się zawalić albo przez Ciebie może przetrwać.

I... róbmy ludzie roboty! To one będą naszą pomocą w przyszłości. Skoro nasza inteligencja się nie rozwija, nasze umiejętności są ograniczone – twórzmy nową inteligencję, nowe technologie, które zadbają o naszą przyszłość, o nasze bezpieczeństwo.

Zbigniew Nawrat
Prezydent ISMR
Redaktor MrR
Zabrze, grudzień 2019

Medical Robotics Reports

Redakcja: ul. Wolności 345a, 41-800 Zabrze

Wydawca: Międzynarodowe Stowarzyszenie

na rzecz Robotyki Medycznej

International Society for Medical Robotics

Rada Naukowa: • Richard Satava, MD (Washington Medical University, USA) • prof. Mehran Anvari (McMaster University, Hamilton, Kanada) • prof. Kevin Warwick (Reading University, Anglia) • prof. Krzysztof Tchoń (Politechnika Wrocławska) • prof. Kaspar Althoefer (Kings College, London) • dr Piotr Sauer (Politechnika Poznańska) • prof. Leszek Podśędkowski (Politechnika Łódzka) • dr Krzysztof Mianowski (Politechnika Warszawska) • prof. med. Romuald Cichoń (Drezno, Wrocław, Warszawa) • prof. Josef Kozak (AAG/BBRAUN Tuttlingen) • prof. med. Andrzej Bochenek (WST, PAKS) • prof. W. Konrad Karcz (LMU München) • Sławomir Marecik, MD (UIC/Lutheran Hospital Chicago, USA)

Redaktor naczelny: dr hab. n. med. Zbigniew Nawrat

Dyrektor zarządzający: lek. mgr Dominik Pawliński

Redaktor tematyczny: mgr inż. Łukasz Mucha

Redaktor statystyczny: dr hab. inż. Paweł Kostka

Redaktor językowy: BS Kaitlyn Dufendach

Sekretarz redakcji / DTP: mgr inż. Katarzyna Ciemny

Webmaster: Katarzyna Ciemny, www.medicalroboticsreports.eu

Okładka: autorem zdjęcia jest Mariusz Jakubowski

Druk: Drukarnia EDIT Sp. z o.o.

Redakcja zastrzega sobie prawo adiacji, skracania oraz zmiany tytułów nadesłanych materiałów. Opinie zawarte w artykułach wyrażają poglądy autorów i nie muszą być zgodne ze stanowiskiem Redakcji. Redakcja nie odpowiada za treść zamieszczonych reklam. Wszelkie prawa zastrzeżone.

Dear Reader, i.e. Robots versus COVID-19

We are presenting you with a new edition of our magazine dated as 2019, but we have moved the real edition to the beginning of 2020 and it is difficult not to modify the opening remarks due to the pandemic and the conclusions resulting therefrom.

First of all: that **we are all connected** to each other. The virus that found its way into the Chinese body thousands kilometers away from us soon was detected in our streets in a dozen days or so. All threats are common. That is why we have to make joint decisions and take responsible actions.

Second: **science and competence**. We need professionals. People who can guide us through crisis situations, who can show us the way, justify it, take on the science and engineering challenges and... use proper communication. Because we all should all understand what is happening and why, since we are the main actors of these actions.

Third: **technology**. If, as in the case of CoVid, it turns out that the threat is the proximity of another person, distance-related technology becomes important. Distance communication technologies are a real help in organizing work, cooperation, maintaining quality of life and of course saving lives. In general, medicine without technology is helpless. After a period of telemedicine development, i.e. sending information, images and decisions remotely, it is time to act remotely. Robots are necessary for this.

Engineers' time is back. After all, they created the foundations of the industrial civilization to which we are beneficiaries. And they are today a chance to make groundbreaking inventions, solve the dilemmas and difficulties that arose.

The fact that social interaction creates a risk will be remembered as the motto of 2020 – *keep your distance*. In this respect, the need of social distancing lockdown, precautions to protect yourself and others from infection creates the need to verify the way health services are provided and patients are treated. Here, telemedicine and robots in treatment specialties are a partial solution, because they allow enable effective remote operation

The introduction of a procedure to isolate anyone who has had contact with a person infected with the COVID-19 virus has caused a cascading reaction in healthcare system, and many clinics, wards and hospitals are disappearing. There is not enough hands to work. Medical robots are not just diagnostics, rehabilitation and therapy. This is not only da Vinci used in complex surgical procedures. Robots are successfully used to prepare personalized medicines, medical and nursing logistics, where they help staff by performing simple tasks, e.g. transport or disinfection of rooms. Currently, the main players on the world market of

medical robots are the companies: Intuitive Surgical, Inc. (USA), Stryker Corporation (USA), Mazor Robotics Ltd. (Israel), Hocoma AG (Switzerland), Hansen Medical Inc. (USA), Accuray Incorporated (USA), Omnicell, Inc. (USA), Ekso Bionics Holdings, Inc. (USA), ARxIUM (USA) and Kirby Lester LLC (US), Houston Medical Robotics (USA), Otto Bock Healthcare, Kinova robotics, Varian Medical Systems, Hocoma AG, Vecna Robotics, Globus Medical, IRobot Corporation, Titan Medical, Inc., KB Medical SA.

In Poland: a) surgical robots: Fundacja Rozwoju Kardiochirurgii im. prof. Zbigniew Religa (Robin Heart Surgical robot), ACCREA Engineering Poland; b) rehabilitation robots: Research Network Łukasiewicz – Institute of Medical Technology and Apparatus ITAM, Industrial Research Institute of Automation and Measurements PIAP, PRODromus (ProdRobot automated gait trainer), MiDmed (projects for creating robots for post-stroke and oncological rehabilitation) including companies offering commercial rehabilitation robots and leading original research works: EG-ZOTECH, PHU Technomex, Meden-Inmed diagnostic robots: Research Network Łukasiewicz – Institute of Medical Technology and Equipment ITAM with the Silesian University of Technology; ACCREA Engineering Poland (tele-USG); c) robotic pharmacy that prepares doses of medicines in individual sets for hospital patients: UniDoseOne Quizit (automated drug dispensing systems for hospital patients); d) care and social robots: ACCREA Engineering Poland, AssisTech, HealthUp, Silesian University of Technology with APA sp.z o.o.; e) disinfection robots: ACCREA Engineering Poland; f) artificial organs: vBionic (printed artificial hand/hand); Foundation for Cardiac Surgery Development prof. Zbigniew Religa (artificial heart and Religa Heart circulatory cardiovascular support systems)

In Europe, it creates an opportunity for small and larger entrepreneurs, e.g. by supporting projects through hubs such as Digital Innovation Hub Healthcare Robotics HERO. It efficiently regroups funds for new purposes such as supporting solutions directly related to reducing the impact, crisis, and epidemic spread.

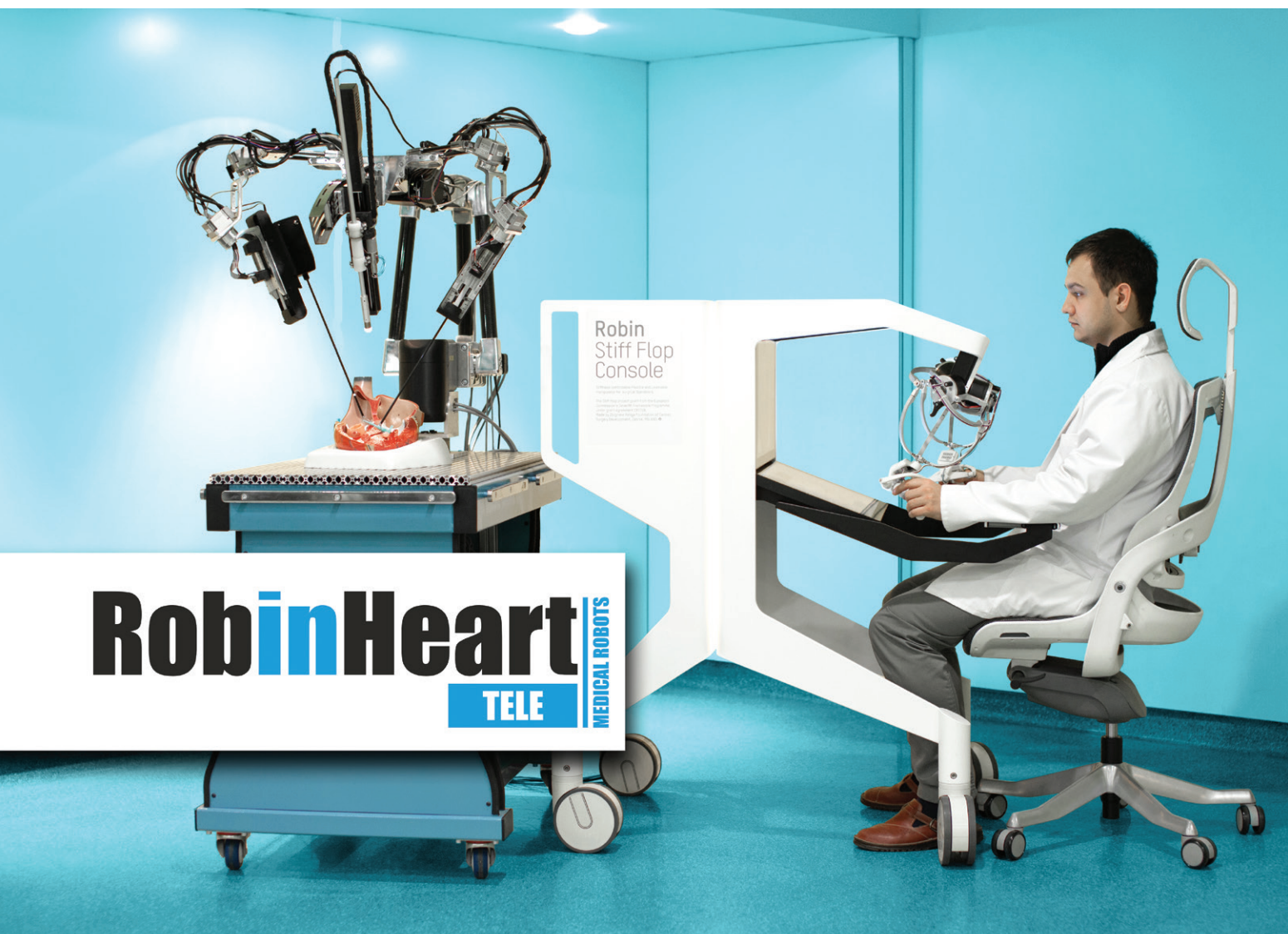
We give you Reader another interesting issue of the magazine of roboticists and doctors, patients and administrators of medical services, inventors and humanists. You will find here an example of a hospital that is dealing well with every situation and is beginning to introduce new standards of management and medical services. Moreover, pioneers of robotic surgery, scientists and engineers overcoming subsequent technological barriers and showing the directions of development of robots for patients' sake. There is also a short report on the progress of the European project supporting enterprises focused on the medical robot market – **DIH Healthcare Robotics HERO**.

The process of changes has already begun, but the pandemic revealed system weaknesses of work based only on direct **doctor-patient** services. Demographic changes, the lack of an appropriate number of medical staff and the need to raise the standards of services rendered in hospitals, outpatient clinics and social welfare homes are global trends that force greater involvement in the field of medical robotics, including the development of artificial intelligence. We move from the doctor-patient system to the **doctor-technology-patient system**. We are more and more prepared for the last phase: **technology – patient** directly. These are robots that today allow us to be “more human”, relieving us from the duties of tedious work, and soon robots will save the future of man a human.

Therefore, let us work together, because only together can we solve the problems of our home, our street, village or city. Because it is in our home that the world begins or ends. Each of our moves, each of us, is important. Because of you, the world may collapse or it can survive thanks to you.

And... **let's make robots!** They will be our help in the future. Since our intelligence is not developing, our skills are limited – let's create a new intelligence, new technology that will take care of our future, our security.

Zbigniew Nawrat
President ISMR,
Editor of Medical Robotics Reports
Zabrze, December, 2019



SPIS TREŚCI:

HEALTHCARE ROBOTICS 2020 & HERO	8
Zbigniew Nawrat, Dariusz Krawczyk	
FROM HERO TO HERO, FROM ROBOT TO HEALTHCARE, FROM INNOVATION TO HUB & FROM ZABRZE TO EU	15
Zbigniew Nawrat	
ANTERIOR APPROACH FOR DETERMINATION OF SAGITTAL SPINOPELVIC PARAMETERS USING ANTERIOR PELVIC PLANE AND STERNUM PLANE: A CASE STUDY ON SYMPTOM-FREE SUBJECTS	20
Paweł Radło, Mateusz Daniół, Lukas Boehler, Josef Kozak	
ALGORYTMY STEROWANIA ADMITANCYJNEGO I IMPEDANCYJNEGO W ROBOTACH MEDYCZNYCH	27
Piotr Sauer, Tomasz Krzykowski	
ROBOTYKA CHIRURGICZNA I NOWE TECHNOLOGIE W CZASACH PANDEMII W SZPITALU NA KLINACH	37
Joanna Szyman	
ZASTOSOWANIE EGZOSZKIELETÓW W REHABILITACJI RUCHOWEJ U PACJENTÓW ZE STWARDNIENIEM ROZSIANYM	41
Dominika Adamczyk, Jacek Jankowski	
ROBOTY W UROLOGII I CO DALEJ?	47
Krzysztof Borkowski	
ROBIN HEART CZYLI JAK POKONAĆ ODLEGŁOŚĆ I WYKORZYSTAĆ CZŁOWIEKA JAKO ELEMENT UKŁADU STEROWANIA TELEMANIPULATORA	48
Zbigniew Nawrat, Dariusz Krawczyk	
ROBOTYKA W MEDYCYNIE ZABIEGOWEJ – SZANSE I WYZWANIA W KSZTAŁCENIU LEKARZY	56
Krzysztof Starszak, Michał Smoczok, Weronika Starszak	
THE CYBERNETIC HOSPITALS REVOLUTION IN THE AGE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE	64
W. Konrad Karcz, Dorian Andrade	
SMART OPERATING ROOM AND SURGERY DRIVEN BY ARTIFICIAL INTELLIGENCE	68
Alexander Frank, W. Konrad Karcz	

PODZIĘKOWANIE

Redakcja składa serdeczne podziękowania za merytoryczny i honorowy wkład w przygotowanie tego wydania czasopisma osobom, które przyjęły na siebie trud recenzji przesłanych do nas publikacji. Recenzantami Medical Robotics Reports wydanie 2019-20 byli wybitni specjaliści robotyki i wielu dziedzin techniki, materiałoznawstwa, biofizyki, medycyny m.in.: prof. dr hab. Jacek Cieślak (AGH, Kraków), dr hab. n. med. Sławomir Grzegorzczyn (SUM Zabrze), W. Konrad Karcz (LMU München), prof. dr hab. Josef Kozak (AAG/BBRAUN Tuttlingen), dr Krzysztof Mianowski (PW, Warszawa), prof. dr hab. Stanisław Mitura (TUL Kalisz), prof. dr hab. Zbigniew Paszenda (PŚI Zabrze), dr n. med. Joanna Śliwka (SCCS, Zabrze)



Healthcare Robotics 2020 & HERO

Zbigniew Nawrat¹⁻³ • Dariusz Krawczyk¹⁻³

■ INTRODUCTION

The traditional definition of robot means artificial man. From this point of view, the robot should have the ability to move (to perform mechanical work) and make decisions based on information provided by its senses (intelligence). Robots create the possibility of standardization and constant improvement of quality through learning (AI) and communication with a professional information network as well as with other medical devices (diagnostic, therapeutic, rehabilitation), and also elements of hospital infrastructure [1].

A medical robot can take on different forms and perform various tasks, just like there are many medical specialties and types of services performed. However, the use of a robot always offers similar benefits: precision, repeatability, efficiency, sometimes flexibility, remote control or more and more often greater independence.

The number of people in the world is approaching 8 billion and 3 million robots help them in industries, factories and services. By 2050, this figure is expected to increase to 9.7 billion. There is still some space here – the average population density in the world in 2015 was 49 people per km² of land (54 excluding Antarctica). By 2050, this figure is expected to increase to 9.7 billion. There is still some space here – the average population density in the world in 2015 was 49 people per km² of land area (54 excluding Antarctica). And a lot of work to be done.

Robots are increasingly supporting humans both at work and in their private lives.

ROBOTS

According to the International Federation of Robotics IFR [2] [www.IFR.org] In 2018, global robot installations increased by 6% to 422,271 units, worth USD 16.5 billion (without software and peripherals). The operational stock of robots was computed at 2,439,543 units (+15%). The number of industrial robots sold globally doubled in

5 years from 2013 to 2017. It is also expected to continue an annual increase of 14 % in the future.

In 2018, the average robot density in the manufacturing industry was 99 robots per 10,000 employees (EU 114, America 99, Asia 91). Europe is the region with the highest robot density, boasting an average value of 114 units.

Forecast: 2019-2022. Worldwide annual sales of industrial robots:

- 2019: 420,870 units, 0% compared to 2018
- 2022: 583,520 units, + 12% per year on average from 2020 to 2022

Sales of medical robots increased by 50% from 3,400 units in 2017 to 5,100 units in 2018. This is 2% of the total unit sales of professional service robots. The most important medical applications are robot assisted surgery or therapy and rehabilitation systems. Medical robots are among the most expensive service robots. (Executive Summary World Robotics 2019 Service Robots) [3].

Medical Robots – most valuable service robots: US\$ 2.8 billion in 2018

- 2018: 5,100 units (+50%)
- 2019: 7,200 units (+39%)
- 2022: 19,700 units (+40% CAGR)

COVID-19

The introduction of a procedure to isolate anyone who has had contact with a person infected with the COVID-19 virus has caused a cascading reaction in healthcare system, and many clinics, wards and hospitals are disappearing. There are not enough hands to work.

It has long been known that demographic problems will cause the need to robotize many areas of human activity. The problem of risk of getting infected during direct contact with other people caused a huge interest in communication technologies (transfer of information) and robots (transfer of action). We are all convinced that soon disinfection robots will face the challenge of fighting the virus directly.

¹ Professor Zbigniew Religa Foundation of Cardiac Surgery Development, Heart Prostheses Institute, Zabrze 41-800, Poland.

² Chair and Department of Biophysics, Faculty of Medical Sciences in Zabrze, Medical University of Silesia, Zabrze 41-808, Poland.

³ International Society for Medical Robotics, Zabrze 41-800, Poland.

MEDICAL ROBOTS & MARKET ACTIVITY

Medical robotics has been the most successful so far in the field of surgical and rehabilitation robots (including exoskeletons). The robot leader on the soft tissue telemanipulator market is the da Vinci robot (Intuitive Surgical). Five thousand robots are currently used in approximately 1 million operations per year, mainly urological and gynecological. New surgical robots appear, e.g., ALF-X (USA), Titan (Canada), and in other areas such as Virtual Incision, TransEnterix (SurgiBot, Senhance robot-assisted surgical system), Corindus Vascular Robotics (cardiological robot, CorPath GRX) or Artas (robot platform for hair implantation) and endoscopic Monarch (Auris Health) and orthopedic Renaissance (Mazor Robotics). Medtronic introduced surgical HUGO (Einstein), and Medrobotics – FLEX – flexible endoscopic robotic tools [1].

There are several FDA-approved devices and platforms for robotic surgery and these include the da Vinci Surgical System, Sensei X Robotic Catheter System, FreeHand 1.2 and invendoscopy E200 system. Also approved are Flex® Robotic System, Senhance, ARES, the Single-Port Instrument Delivery Extended Research (SPIDER) and the NeoGuide Colonoscope. Other technology platforms waiting for FDA approval include MiroSurge, ViaCath System, SPORTTM Surgical System, SurgiBot, Versius Robotic System, Master and Slave Transluminal Endoscopic Robot, Verb Surgical, Miniature In Vivo Robot, and the Einstein Surgical Robot [1].

AI and machine learning technologies enable robots to sense and respond to their environment.

Medical robots will be more and more independent. Thanks to AI and accepted technical solutions guaranteeing security. Corindus, producer of CorPath GRX platform, received permission from the United States Food and Drug Administration (FDA) for the first automated robot movement called "Rotate on Retract (RoR)" in 2018. This is the first step towards introducing autonomous robot operations [1].

Let's sort out [4] (completed by me) the most interesting things we can find on the medical robot market now [5]:

SURGICAL ROBOTS

According to forecast this year sales of surgical robots has almost doubled to USD 6.4 billion.

a) Intuitive Surgical

Manufacturer of the most famous surgical robot da Vinci Surgical System (also the largest business success, the company in 2004 took over the competitive Computer Motion robot manufacturer Zeus I AESOP). Present in over 2,000 hospitals (3 in Poland), almost 5,000 robots sold. This year, probably around 1 million operations around the world. Auris Health, previously known as Auris Surgical Robotics and founded by the founder of Intuitive Surgical (NSDQ: ISRG), Frederic Moll, has re-

ceived FDA approval for the Monarch robotic endoscopy platform. Therefore, this year a new IS product from Ion for lung endoscopy has appeared (a controlled flexible endoscope for observing hard-to-reach places).

b) Transenterix

Founded in 2006 – competitor of Intuitive Surgical in the field of urology and gynecology. After the FDA's rejection of SurgiBot robotics technology in 2016, the company changed its strategy and refined the ALF-X robot under the Senhance Robotic Surgical System brand. It already has permission to be used in Europe.

c) Medrobotics

Established in 2005 (Massachusetts), it received the FDA in 2015 for their Flex Robotic System. It is based on technology developed at Carnegie Mellon University and the University of Pittsburgh. The robot is used to insert the endoscope into such difficult places as the throat, ear, nose to visualize in good quality the image of places operated in a minimally invasive way.

d) Verb Surgical

Is a company founded in 2015 by Alphabet owned by Google and Johnson & Johnson in a strategic partnership with the giants of the world medical technology Ethicon, Johnson & Johnson and Verily Life Sciences (Google Life Sciences). The goal is to create a robot based on the experience of Ethicon and SRI International (Stanford) in the new standard of "digital surgery".

e) Hansen Medical

The Californian company was founded in 2002 and has created two systems for robotic cardiological intervention – transvascular electrophysiology, Sensei Robotic Catheter System and vascular therapy (e.g. endovascular stenting) Magellan Robotic System.

f) MEDTECH

Founded in 2002 in Montpellier (France), the European company operates in the field of brain (ROSA 2007) and spine surgery. FDA since 2016.

g) Titan Medical

The Canadian company has developed the SPORT surgical system for use in minimally invasive surgery through one hole.

h) MiroSurge robot of the German company DLR (German Aerospace Center)

Medtronic has opened the Minimally Invasive Therapies Group, already having a partner in the small company Mazor (Mazor Robotics markets the Renaissance Guidance System for spine and brain surgeries) currently purchased the German Miro system.

i) Cambridge Medical Robotics (CMR)

British company, has presented a new Versius chirurgic surgical robot, which is currently beginning to enter the market.

j) Microbot Medical

American company producing micro-robotic technology devices: ViRob, a crawling, small micro-robot can move in blood vessels, digestive and respiratory sys-

tems and TipCat needle-like, self-propelled, flexible and semi-disposable endoscope.

k) Cyberknife System (Accuray)

The CyberKnife system (USA) is the first and the only dedicated radiosurgical system designed to treat tumors with adequate accuracy anywhere in the body. Available in over 150 hospitals, about 100,000 patients. It is available in Poland.

l) Renishaw's neuromate® Gen III

Robots for neurosurgery

INTRODUCING ROBOTICS TO PHARMACY AND DRUG MANAGEMENT

Automation facilitates the work of medical personnel in the whole range of health care, but is especially needed in nursing, where monotonous and repetitive tasks burden even the most enthusiastic employees. When it comes to drug management or other workflow issues, 21st century solutions should be everywhere: robotics.

a) Aethon

Aethon, a company founded in 2004 in Pittsburgh, is best known for its autonomous TUG mobile robot that can accommodate many racks, carts or containers weighing up to 453 kilograms in the form of medicines, laboratory samples or other sensitive materials. TUG has become common in hospitals and provides over 50,000 weekly deliveries to over 140 hospitals in the United States.

b) Aesynt

Aesynt offers drug management solutions for all forms of drugs, including automation and sterile mixing (in over 80 units). It solves security problems associated with manual compounding, ensures connectivity across the company. The company was named Aesynt in 2013, after the private company Francisco Partners bought McKesson Automation. In 2016, the company was acquired by Omnicell for USD 275 million. "

c) Innovation Associates

Innovation Associates offers 21st century technology for pharmacies. The Harry Boyer company was founded in 1972 as a company dealing with technical production, but after more than two decades completely changed the direction of pharmacy automation. Currently, it is a leading provider of pharmacy automation technologies on the retail, hospital, government and other pharmacy markets, including:

ROBOTx, an automatic drug dosing system with a built-in dosing capacity range.

EXOSKELETONS

Exoskeletons are robotic structures that can help people move and lift huge loads. They can also allow paralyzed people to walk again.

a) Ekso Bionics

It is currently used in over 130 rehabilitation centers around the world (over 70 million steps).

b) Cyberdyne

The Japanese company Cyberdyne, founded in 2004, has developed the HAL work overalls to increase human capabilities – by supporting the care of them and working with heavy loads in factories.

c) Hocoma

The Swiss company, founded in 1996, develops and manufactures automated and sensor-based devices for functional movement therapy. It has centers in the US, Singapore, Slovenia and Chile, and almost 50 partners around the world. Hocoma therapeutic solutions support the treatment of neurological patients with movement disorders due to stroke, spinal cord injury, traumatic brain injury, multiple sclerosis, cerebral palsy or other neurological diseases and injuries, as well as patients with low back pain. Products include medical devices used for automatic training of the neurological treadmill and exoskeleton for the rehabilitation of upper limbs after a stroke or traumatic brain injury.

d) Rewalk Robotics

Founded in 2001, ReWalk Robotics offers the ReWalk exoskeleton, enabling people with lower limb paralysis to walk again (used by over 1,000 people today around the world.)

e) Reha Technology

The Swiss company designs and manufactures robotic devices, e.g. robotic gait trainers for the rehabilitation of neurological movement disorders. The G-EO System trainer allows the patient to move his legs through a series of normal walking patterns.

Exoskeletons are also present on the industrial market. Examples of commercial external skeletons are Innophys' Muscle Suit, Activelink's Powerloader Ninja, Cyberdyne's HAL for Labor Support RB3D's HERCULE, Ekso Bionics' Ekso Vest, Sarcos Robotics' Guardian XO and Noese's Chairless Chair.

Unlike powered outer skeletons, non-powered or "passive" exoskeletons increase strength and provide stability by combining a human-controlled bending / stretching and locking mechanism. The maintenance-free versions of Exos for commercial and industrial use include the MAX Exoskeleton Suite from suitX, the Ekso Bionics work vest, StrongArm Technologies FLx ErgoSkeleton technology, Laevo Laevo and Fortis Lockheed Martin's.

CLEANING AND DISINFECTING WORKS

Xenex Technologies

Founded in Houston in 2008, the company creates the Xenex hygiene robot now present in over 400 hospitals in the US.

It allows for quick and effective systematic UV disinfection of any space in a healthcare facility.

TELEPRESENCE ROBOTS (REMOTE CONTROLLED)

Doctor shortages are global phenomena. The World Health Organization (WHO) estimates a shortage of

around 4.3 million doctors, nurses and health related professionals. Robots with telemedicine devices will certainly appear in an increasing number of clinics and it will be a joint effort to see them in practice.

a) Intouch Health

The InTouch telehealth network created in California serves over 130,000 annual meetings, 11,000 doctors and clinicians, and 1,250 access locations for patients with an annual growth rate of 25% or one hospital per day.

b) VGo Communications

Established in 2007, the company offers a wide range of video communication solutions. In healthcare, doctors and nurses use VGo to increase their coverage, to monitor and consult patients in the hospital, a qualified care center and at home. Family members also use VGo to visit loved ones when they cannot be there in person. In 2015, the start-up was acquired by Vecna Technologies, developing automated robotic solutions used in healthcare.

c) KUKA

In 2018, a company with great experience in the field of industrial robotics enters the medical robot market: Kuka with the LBR iiwa robot – telepresence.

ROBOTIC FRIENDS (ROBOTIC COMPANIONS)

In developed countries, alienation and loneliness cause serious problems, including health ones. Robotics aims to offer solutions enabling elderly and other people without the necessary social support to contact the world. There are different types of companions of robots – humans or animals in shape, smaller or larger – but they all have one thing in common: their purpose is to make life more pleasant and much easier.

a) Luvozo PBC

Established in 2013, the company focuses on developing solutions to improve the quality of life of older people and people with disabilities. In July 2015, the company began testing its flagship product – Sam, a robotic concierge – in a leading senior community in the Washington D.C. area. The robot lowers care costs while increasing patient satisfaction by simply being at home for the elderly at all times.

b) Honda Robotics

In 1986, Honda engineers began a two-legged robot project. After 20 years, ASIMO was presented, a full humanoid robot (with excellent mobility) and communication (verbal) skills, as well as facial recognition. ASIMO was planned to provide assistance to the elderly or those with limited mobility (bed or wheelchair bound). In 2018, the project was stopped – after the successes of ATLAS robots, the American company Boston Dynamics (co-financed by Google X in its time, then sold to SoftBank).

c) Walking robots delivered by Agility Robotics and Boston Dynamics.

Announced in 2019, after 26 years SpotMini is the first robot to enter the Boston Dynamics market.

d) AIST

A leading Japanese industrial automation pioneer, AIST, has developed PARO, an advanced interactive robot covered in fur (seal-like). This therapeutic robot reduces the stress factor experienced by both patients and their caregivers.

IN POLAND:

surgical robots: Fundacja Rozwoju Kardiochirurgii im. prof. Zbigniew Religa (Robin Heart Surgical robot);

rehabilitation robots: Research Network Łukasiewicz – Institute of Medical Technology and Apparatus ITAM, Industrial Research Institute of Automation and Measurements PIAP, PRODromus (ProdRobot automated gait trainer), MiDmed (projects for creating robots for post-stroke and oncological rehabilitation) including companies offering commercial rehabilitation robots and leading original research works: EGZOTECH, PHU Technomex, Meden-Inmed

diagnostic robots: Research Network Łukasiewicz – Institute of Medical Technology and Equipment ITAM with the Silesian University of Technology; ACCREA Engineering Poland (tele-USG),

robotic pharmacy that prepares doses of medicines in individual sets for hospital patients: UniDoseOne Quizit (automated drug dispensing systems for hospital patients)

care and social robots: ACCREA Engineering Poland, AssisTech, HealthUp, Silesian University of Technology with APA sp.z o.o.

disinfection robots: ACCREA Engineering Poland;

artificial organs: vBionic (printed artificial hand/hand); Foundation for Cardiac Surgery Development prof. Zbigniew Religa (artificial heart and Religa Heart circulatory cardiovascular support systems)

In Europe, it creates an opportunity for small and larger entrepreneurs, e.g. by supporting projects through hubs such as Digital Innovation Hub Healthcare Robotics HERO. It efficiently regroups funds for new purposes such as supporting solutions directly related to reducing the impact, crisis, and epidemic spread.

PRODUCT LIFE CYCLE

From the manufacturer's point of view, the product life cycle begins with its development (conceptual, research and development), the culmination occurs when the product is launched, the cycle ends with the product being withdrawn from the market and the introduction of a newer version or a subsequent product. The time to develop a new solution in medical robotics can be estimated at approximately 4-5 years on average. On average, testing takes about 2-3 years, and the certification required to launch a product takes about 1-2 years.

From the user's perspective, the life cycle of a product is related on the one hand to its "lifetime", and on the other hand to the aging of the technologies used to build

it. The life cycle of products in the field of medical robotics can be different and depends on the particular robot or its application. Medical robots can be used for as little as 6 to 10 years.

Barriers for entrepreneurs. The first barrier identified is the cost-effectiveness of ongoing work on developing new products. Another – related to robot certification and admission to the market of medical products.

■ STANDARDS

Medical robots are robots and medical products. Proper preparation of such a product is a big challenge because of the need to comply with many laws, regulations and standards.

According to [6] [www.iso.org] – ISO (the International Organization for Standardization) is a worldwide federation of national standards bodies (ISO member bodies). ISO collaborates closely with the International Electrotechnical Commission (IEC) on all matters of electrotechnical standardization. Medical robots belong to specialist service robots.

Service robot: robot that performs useful tasks for humans or equipment excluding industrial automation applications [SOURCE: ISO 8373:2012, 2.10].

personal care robot

service robot that performs actions contributing directly towards improvement in the quality of life of humans, excluding medical applications [SOURCE: ISO 13482:2014, 3.13]

mobile servant robot

personal care robot that is capable of travelling to perform serving tasks in interaction with humans, such as handling objects or exchanging information [SOURCE: ISO 13482:2014, 3.14]

physical assistant robot

personal care robot that physically assists a user to perform required tasks by providing supplementation or augmentation of personal capabilities [SOURCE: ISO 13482:2014, 3.15]

person carrier robot

personal care robot (3.2) with the purpose of transporting humans to an intended destination [SOURCE: ISO 13482:2014, 3.16]

medical robot

robot intended to be used as MEE or MES

Note 1 to entry: MEE (medical electrical equipment) and MES (medical electrical system) are defined in IEC 60601-1. [SOURCE: IEC/TR 60601-4-1:2017, 3.20]

ISO 13482 is the first safety standard developed for the area of service robots. It allows close human-robot interaction, including human-robot contact. Although ISO 13482 follows well-established principles and practices from standards for industrial robots and machines in general, additional guidance can facilitate its rapid and successful adoption by manufacturers and other stakeholders.

This document clarifies which robots fall under the definition of personal care robots and what distinguishes personal care robots from robots in other areas, such as medical robots or industrial robots. This document also provides further guidance on the risk assessment and risk reduction process to be conducted for a personal care robot. It contains examples of risk assessments for different types of personal care robots that can serve as an example for the user of ISO 13482 for their own risk assessment.

Over the last 10 years, work is underway to prepare special requirements for medical robots. By Katarina Widström, Committee Manager ISO / TC 299 Robotics from SIS, Swedish Institute for Standards, currently medical robots are subject to the following standards:

IEC/TR 60601-4-1:2017

MEDICAL ELECTRICAL EQUIPMENT — PART 4-1: GUIDANCE AND INTERPRETATION — MEDICAL ELECTRICAL EQUIPMENT AND MEDICAL ELECTRICAL SYSTEMS EMPLOYING A DEGREE OF AUTONOMY

IEC 80601-2-77:2019

MEDICAL ELECTRICAL EQUIPMENT — PART 2-77: PARTICULAR REQUIREMENTS FOR THE BASIC SAFETY AND ESSENTIAL PERFORMANCE OF ROBOTICALLY ASSISTED SURGICAL EQUIPMENT

IEC 80601-2-78:2019

MEDICAL ELECTRICAL EQUIPMENT — PART 2-78: PARTICULAR REQUIREMENTS FOR BASIC SAFETY AND ESSENTIAL PERFORMANCE OF MEDICAL ROBOTS FOR REHABILITATION, ASSESSMENT, COMPENSATION OR ALLEVIATION

You find more information at:

<https://www.iso.org/committee/5915511/x/catalogue/p/1/u/0/w/0/d/0>

IEC 80601-2-78:2019 applies to the general requirements for BASIC SAFETY and ESSENTIAL PERFORMANCE of MEDICAL ROBOTS that physically interact with a PATIENT with an IMPAIRMENT to support or perform REHABILITATION, ASSESSMENT, COMPENSATION or ALLEVIATION related to the PATIENTS MOVEMENT FUNCTIONS, as intended by the MANUFACTURER. IEC 80601-2-78:2019 does not apply to external limb prosthetic devices (use ISO 22523), electric wheelchairs (use ISO 7176 (all parts)), diagnostic imaging equipment (e.g. MRI, use IEC 60601-2-33), and personal care ROBOTS (use ISO 13482).

Two **ISO** standards are of high importance for **software medical** devices: **ISO 13485** and **ISO 14971**. They can be seen as the topmost standards for **medical** devices. The international standard **IEC 62304** – medical device software – is a standard which specifies life cycle requirements for the development of medical software and software within medical devices. In my opinion, artificial intelligence is part of medical robotics. That is why it is

worth paying attention to ISO/IEC JTC 1/SC 42 Artificial intelligence (<https://www.iso.org/committee/6794475.html>)

MDR – Medical Device Regulation

From 26 May 2020, Regulation (EU) 2017/745 of the European Parliament and of the Council of 5 April 2017 on medical devices (MDR – Medical Device Regulation) was to apply.

The MDR regulation is to replace the existing EU directives on medical devices, thus creating uniform regulations for the medical devices market throughout the European Union. It is to be used directly in every member state of the European Union.

On March 25, 2020, the European Commission announced that it was working on a proposal to postpone the MDR period. As a result:

Date of application of the Medical Devices Regulation postponed until May 2021

With patient health and safety as a guiding principle, the Council and the Parliament adopted Regulation 2020/561 amending Regulation (EU) 2017/745 on medical devices regarding application dates of certain of its provisions on 23 April. This Regulation enters into force on the day of its publication in the Official Journal of the European Union and postpones the date of application for most MDR provisions by one year. This postponement takes the pressure off national authorities, notified bodies, manufacturers and other actors so they can focus fully on urgent priorities related to the coronavirus crisis.

The In Vitro Diagnostic Medical Devices Regulation's (IVDR, Regulation (EU) 2017/746) corresponding date of application remains the same (May 2022). (https://ec.europa.eu/growth/sectors/medical-devices_en)

AI & ROBOTICS

In our opinion, artificial intelligence, machine learning is a field of robotics. Its development makes us think more and more boldly about robots becoming independent. Image analysis is one of the medical fields that is a natural area for testing artificial intelligence (from historical point of view machine learning have been developed by looking at, analysing natural solutions for the perception of the human brain). As reported by Yole Development, the value of the artificial intelligence market for imaging diagnostics has increased in three years from zero to 500 million dollars (2020) and will increase fivefold in the next 5 years (over 2.7 billion in 2025). It will be the fastest growing market in the IT and electronics sectors. Over \$ 2 billion has been spent on research into the use of AI for medical purposes since 2010. The use of AI in imaging diagnostics allows for greater precision and automation of the diagnosis process.

The development of robotics is one of the important areas of innovation which it is evaluated differently in

different countries. Bloomberg has published an annual innovation index. Germany and South Korea are leading (let's compare with robotization status). Poland in total 25th place. We fell by 3 places. Depending on the category, its best – 17th in the production category, but 39th in the productivity category and 38th in the density of researchers and scientists.



SUPPORT

DIH-HERO (DIGITAL INNOVATION HUBS IN HEALTHCARE ROBOTICS)

DIH-HERO (Digital Innovation Hubs in Healthcare Robotics) established a broad-based pan-European network of Digital Innovation Hubs specializing in Healthcare Robotics. DIH-HERO operate throughout the healthcare "pathway" that connects Prevention, Diagnosis, Treatment and Care as well as covering all aspects of hospital logistics and clinical services. It will also focus on home and care-based robotics addressing healthy aging and elderly care. [7] [Information from: <https://dih-hero.eu/>]

Digital Innovation Hub Healthcare Robotics is an independent and sustainable platform for all those who are active in the healthcare ecosystem. Aim: to speed up innovation and reduce time-to-market with a pan-European network. DIH-HERO especially focuses on supporting small and medium-sized enterprises.

DIH-HERO is supported by the European community (European Union's Horizon 2020 research and innovation program under grant agreement No 825003) for four years beginning on January 2019 with 1€16 million of which €8 million will be invested into DIH-HERO own call for SMEs. Then from January 2023 and further DIH-HERO will stand on its own as healthcare network.

Furthermore, DIH-HERO will engage in necessary standardization for robotics in healthcare, including ethical, legal and societal issues.

HERO GRANTS

HERO grants are meant to provide financial support for eligible projects tailored to the five main application areas:

- Diagnostic Robotics
- Interventional Robotics
- Rehabilitation Robotics
- Robotics supporting Patients
- Robotics supporting Healthcare Professionals

Travel vouchers: By providing SMEs with 200 travel vouchers for cross-border travelling up to a maximum amount of €2,000 per voucher, financial barriers that

hinder connectivity are reduced and knowledge exchange is stimulated.

The Technology Demonstrator call (max. € 100,000) is to stimulate cross-border collaboration among pan-European companies (SME's and slightly larger companies) which are working in the area of Healthcare Robotics.

Technology Transfer Experiment (TTE) call (max. €200,000) is to stimulate the transfer of technology from outside and creating new links inside the value chain. All proposals must include a transfer of innovative technologies from outside the robotics and healthcare domains and must contribute to solving unanswered clinical questions or solve implementation hurdles is the goal of this innovation strategy. <https://dih-hero.eu/calls/>

HERO & COVID 19

DIH-HERO with its extensive Robotics in Healthcare European network is fighting against COVID-19 to support healthcare professionals and save lives.

Therefore, the DIH-HERO consortium has decided to open an additional short call for funding directed at robotics-based technologies that bear the potential to contribute in the fight against COVID-19 in the short-term.

The COVID-19 call with a funding up to 100.000 € is targeted at supporting robotic technologies and solutions in the later stages of development that can be deployed in the healthcare sector to support healthcare professionals by satisfying a current clinical demand or need.

Although the submission period of only one week has been very short for this special call 146 proposals have been submitted before the deadline on the 17th of April 2020. After the first evaluation of all these great proposals and fantastic ideas, the evaluators invited the Top 20 highest ranked proposals for a 10-minute video interview in order to get to the final ranking of proposals to be awarded. We are very glad to announce the first awarded third parties Fighting against COVID-19 open call, which are given at random below:

- Voxdale
- F&P Robotics AG
- Akara Robotics Limited
- Jonker-Makis Robotics B.V.
- Hocoma AG
- MetraLabs GmbH Neue Technologien und Systeme
- ACCREA Engineering Sp. z o.o.
- KELO Robotics GmbH
- PAL Robotics
- Rubedo sistemas

SUMMARY

As shortly as possible:

- Robots are created to multiply human freedom.
- **Let's make robots! They will be our help in the future.**

Financial support and sponsorship

This work was done as part of our duties to disseminate knowledge about the possibilities offered by robot technologies for medicine supported by the EU project Digital Innovation Hubs in Healthcare Robotics HERO H2020/825003.

Reference:

- [1] Nawrat. Mini-invasive Surg 2020;4:28 MIS AI – artificial intelligence application in minimally invasive surgery
- [2] www.ifr.org
- [3] <https://ifr.org/downloads/press2018/IFR%20World%20Robotics%20Presentation%20-%202018%20Sept%202019.pdf>
- [4] <https://medicalfuturist.com/top-healthcare-companies-in-robotics>. March 2017
- [5] Zbigniew Nawrat, Rozdz 6. Robot jako urządzenie służące do pozyskiwania i przetwarzania informacji oraz działania w zakresie usług medycznych. "Inżynieria Biomedyczna. Podstawy i Zastosowania" Tom "Informatyka w medycynie" Red. Leon Bobrowki, Marek Kurzyński, Antoni Nowakowski, Jacek Rumiński.:
- [6] www.iso.org
- [7] dih-hero.eu



From hero to HERO, from robot to healthcare, from innovation to hub & from Zabrze to EU

Zbigniew Nawrat¹⁻³

The key to modern medicine is the increase in productivity. It cannot be done without automation and robotics – from decision-making processes to therapy and rehabilitation. Due to demographic threats, an important advantage of using robots is the reduction of employment requirements – both regarding the number and skills or education.

After telecommunications progress – sending information at a distance, it is time for long-distance transmission of ACTION. Robots are necessary for this. And Human.

Robot will be our **hero** of the future. If we create them to suit our dreams and needs. Our intelligence is not growing, and manual skills are also not, so our safety and development depend on robots.

The most important goal, from the **Polish perspective**, both of social and economic importance, is the introduction of Polish companies to EU market. Poland is a good place to incubate and develop innovative robot technologies.

We have good universities and excellent graduates – both in engineering and medical sciences. We have innovative doctors, working in great public and private clinics, ready for new challenges. We also have numerous patients who require treatment, therapy, diagnostics and rehabilitation at the right level. Medical robots are today the only chance to fulfill social obligations regarding efficient, effective medicine and widely available medical services. Automated diagnostics, reduction of invasiveness of operations, requirement for standardization of treatment specialties and access to databases as well as advisory programs increasing effectiveness and optimizing medical activities for a particular patient (personalization) – require the use of medical robots and artificial intelligence. Care services at home and at work, security, freedom of a person with reduced mobility in cities and in the countryside – requires remote supervision technology. We have unique original experience in the field of telesurgical, teleradiologic, rehabilitation, social and rescue robots in Poland. We believe in the power of co-operation, the need to exchange experiences and communication at the scientific and business level.

The market of medical robots is growing about 20 percent. annually.

The most well-known surgical robot today is the product of Intuitive Surgical – the da Vinci robot system (we already have ten in Poland), which was constructed for cardiac surgery. Practice has shown, however, that the advantages of the system predestine it for another type of surgery and today it is mainly used in gynecology and urology.

The Polish market of robotic surgery recorded dynamic **growth** last year. 900 procedures with the use of da Vinci surgical robots were performed in Polish hospitals in 2019. In 2018 – 60 (according to the Da Vinci distributor in Poland, Synektik). For comparison – in 2019, around 1.25 million operations were carried out globally with the use of almost 5.5 thousand. these types of systems. Treatments with the participation of the da Vinci system are carried out in Poland in both private and public hospitals: in Wrocław, Warsaw, Poznań, Białystok, Kraków, Wieliszew and Siedlce.

Although the first experience of using surgical robots was 15 years ago, we are lagging behind for economic and legal reasons. In a country the size of Poland, we estimate that there should be about 35-40 Da Vinci robots (average 1 robot per million inhabitants).

According to estimates of PMR, Upper Finance, Synektik, 2019, the surgical robotics market in Poland will increase in 2019-2023 from PLN 92 million to almost PLN 500 million, which means that the average annual value increase (CAGR) of this segment will amount to as much as 50%. According to research conducted by PMR in various healthcare sectors in Poland, in recent years a growing barrier to healthcare, there are problems with an insufficient number of qualified medical staff. In total, there are over 20 such trained doctors in Poland. For comparison, around 45,000 work worldwide doctors trained in working with the Da Vinci system.

The increase in the activity of private hospitals in the absence of funding for robot operations from the National Health Fund shows that awareness of the need for medical robots is growing in Poland.

¹ Professor Zbigniew Religa Foundation of Cardiac Surgery Development, Heart Prostheses Institute, Zabrze 41-800, Poland.

² Chair and Department of Biophysics, Faculty of Medical Sciences in Zabrze, Medical University of Silesia, Zabrze 41-808, Poland.

³ International Society for Medical Robotics, Zabrze 41-800, Poland.

We hope that our work as part of the **DIH HERO** project also increases the interest in medical robotics and creates a reasonable concept for further development in Poland modern medicine, in which medical robots (of various specialties) will take their rightful place.

As explained by prof. Romuald Cichoń (during our **Medical Robotics Conference & DiH HERO InfoDay**), Intuitive Surgical's mistake was to emphasize the huge profits associated with the distribution of tools, with the possibility of using them only in 10 operations, costly service, etc. which limits the possibility of robot distribution.

- The problem of the profitability of cardiac surgery is associated with the fact that for cardio surgery you need twice as many tools as for prostate surgery. Each of these tools which can be used 10 times costs several thousand dollars. It is the Narodowy Fundusz Zdrowia (National Health Fund) valuation of PLN 20,000 for bypass surgery is an insurmountable barrier.

We have both outstanding personalities and significant achievements in Poland. In addition to pioneering work on surgical robots (**Robin Heart** at FRK in Zabrze), several valuable rehabilitation solutions (e.g. Michael Mikulski and **Luna** robot), **ACCRESA** from Lublin it is worth mentioning – where original social & diagnostic robots were created as a part of projects (partially financed by EU grants) supervised by Bartłomiej Stańczyk and Jakub Musiałek from the Łódź **UniDoseOne** company producing a robot – hospital pharmacy – dispensing robot, a warehouse that stores about 15 thousand doses and 1500 types of drugs. He completes the order and places it in the patient's container.

Activities carried out under DIH HERO – numerous conversations, meetings, conferences, workshops, fairs – have shown great interest in the offer of financial support for companies (Travel Voucher, Technology Demonstrator, Technology Transfer Experiments) through the DIH HERO project.

Entrepreneurs point out the problems with meeting the requirements of medical standards. A technical standard for medical robots has been being developed for years, but legal regulations often are not longer up to date with product development by producer in this area. In particular, this applies to software, AI & IT. The biggest threat to creating a market offer companies see in the implementation of the new medical directive in Europe this year. There are no offices qualified to carry out products through certification. The high costs incurred for certification and maintaining the appropriate legal status constitute a significant part of the permanent burden on innovative companies. Only large companies will be able to afford an efficient legal protection team – product certification and intellectual property protection, which contributes to market globalization. Another risk of undertaking bold market activities is the lack of qualified,

available (* cheaper) staff due to the drainage of talents by neighboring countries and large, global companies located in Poland.

A characteristic feature of the listed leading **SME** companies is the strong role of the charismatic leader, with extensive substantive knowledge, scientific experience of the boss, founder. It is the person who creates the directions of the company's development and supervises its substantive progress.

About 10 Polish entrepreneurs in the robotics industry declare their willingness to participate in the DIH HERO project and consider the offer of financial and organizational support by DIH HERO as important for the development of their own enterprises. A similar number of academic, scientific and research centers is preparing an offer of support for specific needs declared by companies from our region. The only area where there is a lack of competence is support in product certification under the new medical directive currently in force in Europe.

Medicine needs **innovation**. Innovators need a quick exchange of information and sharing of responsibilities. So they need a **hub**. But we all need a work culture based on freedom and trust. As the history of civilization shows, the most important key of progress and universality for most people access to good life (well-being) is freedom in culture, science and entrepreneurship. **CULTURE** is the key to the success of building a better future. The culture of inventiveness, trust, consent for both failure and success. **Acceptance**. Implementation of unsurpassed projects. Attempts to make your dreams come true.

Foundation for the Development of Cardiac Surgery (FRK) Polish partner of the DiH Healthcare Robotics HERO project is a well-known research, implementation and education center. In 2019 the most important was **XVII Medical Robots Conference (SCIENCE) + Digital Innovation Hub Robotics in Healthcare HERO Info Day (offers for companies from SME sector) + Robot Demonstrations (5 Robin Heart, Luna, ACCRESA, Kinova) + Medical Robots Testing Workshops** as an offer of the FRK + **Medical Robotics MR FORUM with panels EDUCATION, RESEARCH, MARKET, USERS, BUSINESS, SUPPORT, 05.07. 2019 in Fundacja Rozwoju Kardiochirurgii, Zabrze = 1 day, 8 hours, 4 events, 15 lecture, 8 robots show, 3 workshop original robotic testing show station in use, 108 documented active participants**. The media (press, radio, TV, Internet) multiplied the social impact of this meeting. Some conclusions from the discussion during the Forum are included in this article. However, the most important conclusion is: **let's make robots, our safe future depends on them!**

FINANCIAL SUPPORT AND SPONSORSHIP

This work was supported by the EU project Digital Innovation Hubs in Healthcare Robotics HERO H2020/825003.

XVII Konferencja Roboty Medyczne/Medical Robots 2019
5 lipca 2019 – ZABRZE – Fundacja Rozwoju Kardiochirurgii Zabrze im. prof. Zbigniewa Religi.

9.00. OTWARCIE KONFERENCJI

Roboty medyczne 2019 – wprowadzenie. Zbigniew Nawrat prezydent ISMR

9.10. SESJA INSPIRACJE – ORTOPEDIA

1. Piotr Sauer¹, Paweł Szulczyński¹, Bartosz Breninek², Kacper Gruszczyński², Bartłomiej Lubiowski². **Badania eksperymentalne inercyjnego modułu pomiarowego IMU systemu RSQ Motion.** ¹Instytut Automatyki i Robotyki, Politechnika Poznańska. ²RSQ Technologies sp. z o.o., Poznań,
2. Józef Kozak. **Pelvic Tilt Angle Differences Between Symptom-Free Young Subjects and Elderly Patients Scheduled for THA: The Rationale for Tilt-Adjusted Acetabular Cup Implantation.** Aesculap AG, Am Aesculap Platz, Tuttlingen, Germany.

9.30. SESJA ROBOTY CHIRURGICZNE

3. Łukasz Mucha. **Instrumentarium do operacji minimalnie inwazyjnych.** Fundacja Rozwoju Kardiochirurgii im. prof. Zbigniewa Religi.
4. Krzysztof Lis¹, Krzysztof Lechrich¹, Łukasz Mucha², Zbigniew Nawrat². **Innowacyjny manipulator 5-cio osiowy o kinematyce równoległej – prototyp oraz testy.** ¹Politechnika Śląska, Katedra Budowy Maszyn, ²Fundacja Rozwoju Kardiochirurgii im. prof. Zbigniewa Religi.
5. Dariusz Krawczyk¹, Łukasz Mucha¹, Krzysztof Lis², Zbigniew Nawrat^{1,3}. **Sterowanie robotem chirurgicznym z siłowym sprzężeniem zwrotnym – wstępne testy funkcjonalne robota Robin Heart.** ¹Pracownia Biocybernetyki, Fundacja Rozwoju Kardiochirurgii im. prof. Zbigniewa Religi w Zabrze, ²Katedra Budowy Maszyn, Politechnika Śląska w Gliwicach, ³Katedra i Zakład Biofizyki, Śląski Uniwersytet Medyczny w Katowicach.

10.00. SESJA INSPIRACJE – OKULISTYKA

6. Michał Pośpiech¹, Robert Wasilewicz², Katarzyna Mitura¹. **Wpływ laseroterapii 2RT na biomechanikę siatkówki.** ¹TUL – TECHNICKA UNIVERZITA V LIBERCI (Czechy), ²[Wasilewicz]-EyeClinic.
7. Robert Wasilewicz¹, Michał Pośpiech², Cezary Mazurek². **Wpływ układu sercowo-naczyniowego na biomechanikę gałki ocznej.** ¹[Wasilewicz]-EyeClinic, ²Poznańskie Centrum Superkomputerowo-Sieciowe, Juliusz Pukacki-Poznańskie Centrum Superkomputerowo-Sieciowe.

10.20. SESJA ROBOTY DIAGNOSTYCZNE

8. Bartłomiej Stańczyk. **Reaching the unreachable – with robots.** ACCREA Lublin
9. Klaudia Żmuda. **Remote Ultrasound robot – from a designer perspective.** Projekt obudowy urządzenia telemedycznego umożliwiającego zdalne badanie USG pacjenta, realizowany we współpracy z firmą ACCREA Engineering, ASP Katowice
10. Anna Poświata. **Therapy and assessment of neurological patients using Luna EMG robot.** EGZOTECH Gliwice





INFO DAY HERO-PL

<http://conference.medicalrobots.pl/pl/program-2019-konferencja/>

XVII Medical Robots Conference (SCIENCE) +
Digital Innovation Hub Robotics in Healthcare HERO +
MR FORUM with panels RESEARCH, MARKET, USERS, BUSINESS
05.07. 2019 – Fundacja Rozwoju Kardiochirurgii w Zabrze

11.00 INFO DAY DIGITAL INNOVATION HUB IN HEALTHCARE ROBOTICS

- 11.00-11.20 **INTRODUCTION** to Digital Innovation Hub in Healthcare Robotics. by Zbigniew Nawrat
- 11.20-11.30 **Robotics in 2020 Strategic Research Agenda for Robotics in Europe and what's next?** by Zbigniew Nawrat & Romuald Cichoń
- 11.30-11.40 **The role of the FRK as the core partner of DiH HERO – an invitation to cooperation.** by Zbigniew Nawrat
- 11.40-11.50 **The most important directions of the development of medical robotics – duet: surgeon and inventor.** by Zbigniew Nawrat & Romuald Cichoń
- 11.50-12.00 **Discussion**
- 12.00 **Invitation to the robot show and workshop "Testing of medical robots in the FRK"**
- 12.00-13.00 **LUNCH & robot** (Robin Heart, Luna, ACCREA) show and workshop "Testing of medical robots in the FRK"



I FORUM Robotyki Medycznej

Sesja Paneli Dyskusyjnych

Prowadzenie: Zbigniew Nawrat, prezydent ISMR



13.00-13.30 PANEL AKADEMICKI (EDUCATION)

Paneliści: prof. **Marek Gzik** (Wydział Inżynierii Biomedycznej, Katedra Biomechatroniki Politechnika Śląska, Gliwice), prof. **Józef Kozak** (AESCULAP/AGH – Tuttlingen/Kraków), dr Krzysztof Arent (Katedra Cybernetyki i Robotyki Wydział Elektroniki Politechnika Wrocławska), dr **Piotr Sauer** (Politechnika Poznańska), prof. **Jacek Cieślik** (AGH) i prof. **Jerzy Małachowski** (WAT).



13.30-14.00 PANEL PRZEDSIĘBIORCÓW/PRODUCENTÓW ROBOTÓW MEDYCZNYCH (ENTERPRISES/ MARKET)

Paneliści: Artur Pollak (APAGroup, Gliwice), **Bartłomiej Stańczyk** (ACCRA, Lublin), **Anna Poświata i Małgorzata Jarząbek** (Egzotech Gliwice), **Krzysztof Cygoń** (Technomex, Gliwice), **Wiesław Zinka** (Meden Inmed, Koszalin).



14.00-14.30 PANEL WYNAŁAZCÓW O BADACZY ROBOTÓW MEDYCZNYCH (INNOVATORS/RESEARCH)

Paneliści: **Bartłomiej Stańczyk** (ACCRA), **Andrzej Michnik** (Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Techniki i Aparatury Medycznej), **Łukasz Mucha** (FRK, Zabrze), **Krzysztof Lis** (PŚI, Gliwice), **Jacek Cieślik** (AGH, Kraków), **Józef Kozak** (AESCULAP, Tuttlingen).



14.30-15.00 PANEL MENEDŻERÓW WDRAŻAJĄCYCH ROBOTY (BUSINESS)

Paneliści: **Joanna Szyman** (NEO Hospital), **Józefa Job** (Szpital na Klinach w Krakowie), **Artur Ostrowski** (Synektik Warszawa), doc. **Marek Zawadzki**/prof. **Wojciech Witkiewicz** (Wojewódzki Szpital Specjalistyczny we Wrocławiu – telekonferencja 14.50),



15.00-16.00 PANEL UŻYTKOWNIKÓW ROBOTÓW MEDYCZNYCH (USERS)

Paneliści: doc. **Marek Zawadzki**/prof. **Wojciech Witkiewicz** (Wojewódzki Szpital Specjalistyczny we Wrocławiu – telekonferencja 15.00 -15.20), prof. **Romuald Cichoń** (Dolnośląskie Centrum Chorób Serca „Medinet” Wrocław, WUM Warszawa, KK Drezden), prof. **Wojciech Konrad Karcz** (Klinika Chirurgii Uniwersytetu Ludwika Maxymiliana w Monachium), dr **Sławomir Marecik** (University of Illinois, Chicago, Advocate Lutheran General Hospital, Park Ridge – telekonferencja 15.30).



16.00-16.30 PANEL WSPARCIA FINANSOWEGO I ORGANIZACYJNEGO = KLASTRY/CENTRA TRANSFERU TECHNOLOGII/FINANSOWANIE (SUPPORT)

Paneliści: **Izabela Czeremcha** (Klaster MedSilesia, Gliwice), **Kazimierz Murzyn** (Klaster LifeSciences, Kraków), **Barbara Jarzębska** (Centrum Transferu Technologii, Śląski Uniwersytet Medyczny, Katowice), **Marcin Sprawka** (Yoshi), **Luc Palmen** (InoCo).

16.30-17.00 PANEL KONFRONTACJE. CONFRONTATION & INSPIRATION & SUMMARY

17.00 ZAKOŃCZENIE I FORUM ROBOTYKI MEDYCZNEJ.

Info: www.medicalrobots.eu

Anterior Approach for Determination of Sagittal Spinopelvic Parameters using Anterior Pelvic Plane and Sternum Plane: A Case Study on Symptom-Free Subjects

Manuscript category: Original Research

Artykuł recenzowany

**PAWEŁ RADŁO¹,
MATEUSZ DANIOŁ²,
LUKAS BOEHLER²,
JOSEF KOZAK^{2,3}**

¹Ortopedicum, Krakow, Poland

²AGH University of Science
and Technology, Krakow, Poland

³Aesculap AG, Tuttlingen, Germany

Keywords:

Smart Navigated Ultrasound (SNU);
Pelvic Tilt (PT) in the Anterior Pelvic
Plane (APP); Hip-Spine Syndrome
(HiSS); Range of Motion (ROM);
Computer Assisted Orthopedic
Surgery (CAOS); Computer Assisted
Robotic Surgery

Abstract

Sagittal imbalance causes low back pain, hip impingement, and influences the whole skeleton and muscular system of our body. It is documented in the literature on spinal deformities that good long-term surgical results can only be achieved by restoring sagittal balance and spinopelvic harmony as part of surgical treatment. Currently, the state of the art in sagittal balance determination is based on conventional radiology or an EOS system both using X-ray radiation. These procedures are associated with radiation exposure for the patients. Therefore, a new anterior approach is shown in this work to measure sagittal balance with a navigated ultrasound system without any radiation exposure. The anterior pelvic plane and a newly defined sternum plane are considered to provide an assessment of the sagittal balance. This new approach was tested in a trial on 10 symptom-free subjects by using a smartphone navigated ultrasound system. The relationship between the rotation of the pelvis and the upper body inclination in young healthy people is examined in a standing position. The study with new determined landmarks (incisura jugularis, superior iliac spinas, and symphysis pubis) gives us significant different results between male and female test persons. A proposal for a classification of sagittal balance is achieved which defines a reasonable range for the Sternum Tilt of $-0.1 \pm 1.5^\circ / 3.7 \pm 2.5^\circ$. The significant advantage of this method is to evaluate the sagittal balance with a cost effective, smart system without any radiation exposure to the patient.

INTRODUCTION

The importance of the spinal sagittal balance for a normal functioning of the spine has been known for decades. The consequences for spinal surgery have been discussed and the extensive literature shows the need for the surgically restored sagittal profile.

The sagittal balance of the trunk defines the posture in which the human body stands upright with minimal muscle work. The head is above the pelvis and the pelvis above the feet, i.e. the support quadrilateral [1]. The musculature supports the bone morphology in order to enable a stable state [2]. Body weight is transmitted through the spine, sacrum to the pelvis and hips and from there to the lower limbs, being mainly supported by the bones and with only minimal muscular support. This condition is also described as dynamic stability according to Dubousset [3]. Spinal aging, degeneration deformity, posttraumatic misalignment or postoperative trauma can interfere with this alignment and lead to a sagittal imbalance. This can be a reason of functional, neurological and/or mechanical cascade causing back pain [4], worsening of spine disease, hip and knees impingement, difficulties in standing position and deteriorating walking efficiency. Thus patient's quality of life is significantly reduced. The results of spinal degeneration surgery also strongly depend on maintaining or restoring normal sagittal balance [5].

As a standard, radiographs of the spine and pelvis are performed in anteroposterior (AP) and lateral projections. In AP, view scoliosis (Cobb angle) and coronal balance (C7 plumb line and central sacral vertical line) are evaluated. While in a lateral view a sagittal balance is assessed using sagittal vertical axis, lumbar lordosis, thoracic kyphosis and spino-pelvic balance parameters such as pelvic incidence (PI), sacral slope (SS) and pelvic tilt (PT) [6,13]. The basic parameters contained in the X-ray image are shown in Fig. 1. The most important clinical parameter of spinal alignment is the line called the axis of the sacral spine (SVA). Its relative anterior or shift to the sacrum significantly undermines the quality of patients' life.

However, X-ray methods allow us to determine the exact location of SVA we need a more standardized and less radiation-laden test. There is the EOS, however, it is a stationary system, still based on ionizing radiation [7]. Radiological examinations hold a risk for the health, that is why the frequency of measurements should be limited making it difficult in follow-up [8]. Therefore, this work focusses on the development of a non-radiological measurement method. An evaluation of the currently used measuring systems leads to the use of a sonographic system, because there is no radiation exposure for the

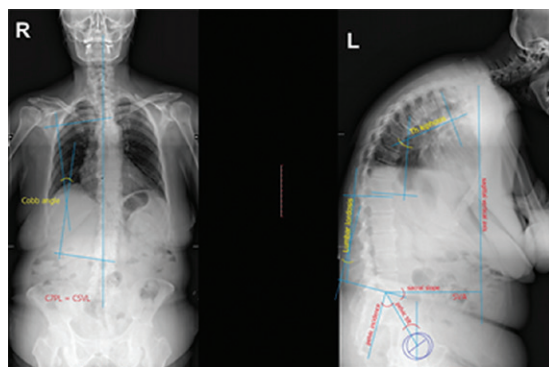


Figure 1. The Pelvic Incidence (PI) corresponds to an angle between the connecting line between the hip joint center and the midpoint of S1 and a line perpendicular to the S1 end plate. The most important clinical parameter of spinal alignment is the line called the axis of the sacral spine (SVA)



Figure 2. Components of the measurement system: (1) reference rigid body (Aesculap AG, Tuttlingen, Germany), (2) handheld tracking system (iPhone 7, Apple Inc., Cupertino, USA), (3) Ultrasound device (Echo Blaster 128, Telemed, Vilnius, Lithuania) and (4) ultrasound transducer with attached rigid body, (5) central unit (Microsoft Surface Pro 4 tablet)

patient. However, the problem occurs that the anatomical landmarks used in radiological examinations are very difficult to detect using ultrasound (US). For this reason, new landmarks are proposed for an anterior measuring approach.

MATERIAL AND METHODS

DESCRIPTION OF THE SYSTEM

The measuring system consists of an ultrasonic system with a combined passive infrared transmitter (3) connected to a computer (4) and a recording device in the visible light (camera of mobile phone) with localization software. The system uses 2 passive infrared transmitters (1, 3). First infrared transmitter is a fixed reference and the second is attached to ultrasound probe. Smartphone serves as an optical localizer of both infrared transmitters.

The hardware components used by the navigated ultrasound system are shown in Fig. 2.

The ultrasound (US) images are captured by an Echo Blaster 128 US device (Telemed). The width of

the probe and the scanning depth are both 80 mm [9]. The probe is tracked by an optical localizer running on an mobile phone, using the calibrated rear camera and the built-in light emitting flashlight. For getting the gravitational vector into the referencing coordinate system the integrated orientation sensors of the mo-bile device are used. An iOS app is currently available and the hardware is iPhone 7. The main application is running on the Microsoft Surface Pro 4 tablet with USB connected ultrasound device. Application guides the operator through the measurement steps, displays the US images, offers a marking function to select the exact landmarks and presents the results after the marking process. The application communicates with the optical localizer using a Wi-Fi Direct connection over TCP/IP to get the rotation and translation data of the infrared transmitters. System described by Martin et al [10]. Is able to record 3 pelvic landmarks: the left and right Anterior Superior Iliac Spine (ASIS) and the symphysis pubis. The three landmarks span the Anterior Pelvic Plane (APP) and the Pelvic Tilt of this plane towards the gravity vector is calculated by the software. Software of Martin et al. is extended in this work with the incisura jugularis (IJ) as additional landmark and a Sternum Tilt.

SELECTION OF ANATOMICAL PARAMETERS

In the radiological examination, three critical spinopelvic parameters pelvic incidence (PI), sacral slope (SS) and pelvic tilt (PT) and anterior pelvic plane tilt (APPT) are defined as shown in Fig. 3. [11, 12].

The Pelvic Incidence (PI) is an individually different morphological constant and geometrically describes the position of the sacrum in the pelvis and its correlations to the acetabulums. The value of PI is characteristic of each individual and does not change throughout the life. Sacral Slope (SS) is the angle between a horizontal line and a line along the top of S1 endplate. Pelvic Tilt (PT) is the angle between the vertical of the geometrical center of hips joints and the connecting line between the geometrical centers of hips joints to the midpoint of S1 endplate.

The value of PI is equal to the sum of the PT and SS. It has been shown that the larger the PI, the higher a pelvic rotation [14]. The pelvis rotates anterior or posterior around the femoral head axis responding to a change from the spine or legs geometry.

The Pelvic Tilt is being considered to define current (dynamic) pelvic rotation.

Pelvic tilt is a parameter determining the current pelvic rotation which is indication of spino-pelvic imbalance compensation. For this value, the landmarks of the sacrum and the acetabula are used.

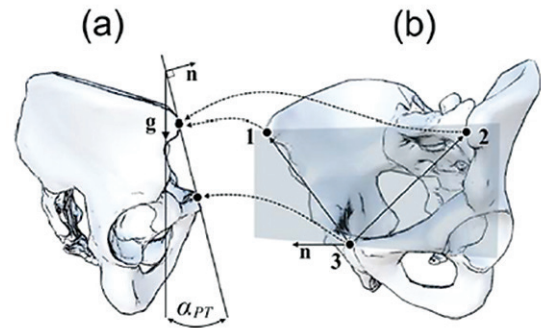


Figure 3. (a) Pelvic tilt in the APP, defined as the angle between the APP and the gravity vector in upright position, and (b) Anterior Pelvic Plane (APP), defined as the plane through the right and left anterior superior iliac spines (1 and 2) and the symphysis pubis (3)

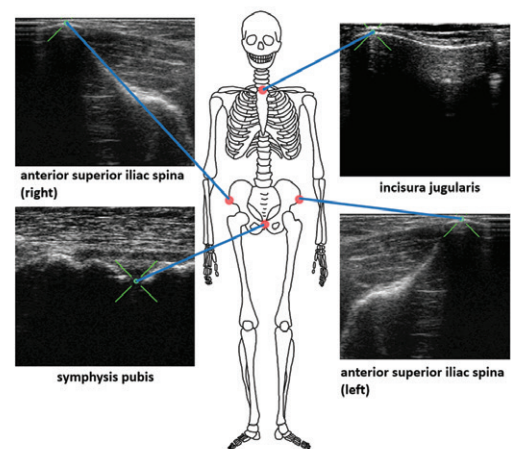


Figure 4. The graphical representation of the landmarks and their ultrasound images, clockwise: incisura jugularis (IJ), anterior superior iliac spina left (ASIS-L), symphysis pubis (SP) and anterior superior iliac spina right (ASIS-R)

Due to the difficulty to detect the anatomical structures of the current landmarks using ultrasound, in this paper the new landmarks are defined.

It has been proven that there is a strong correlation of PT with Anterior Pelvic Plane (APP). APP is defined by the plane between ASIS and symphysis. In this paper PT describes the rotation of the APP [12]. APPA is the angle between APP and gravity line (see Fig. 3). The landmarks of APP are well recognizable with ultrasound (see Fig. 4) [10]. Also the ASIS balance is defined by the angle between the ASIS relative to the horizontal vector as Spinas Balance (Coronal Pelvic Rotation). Since a pelvic rotation in the coronal plane must also be considered as shown in Fig. 4. This parameter provides an information about the coronal balance. In this work the focus was on the sagittal balance which is why the Spinas Balance (Coronal Pelvic Rotation) is not evaluated. Still, all measured subjects are coronal balanced for a good comparability in this study.

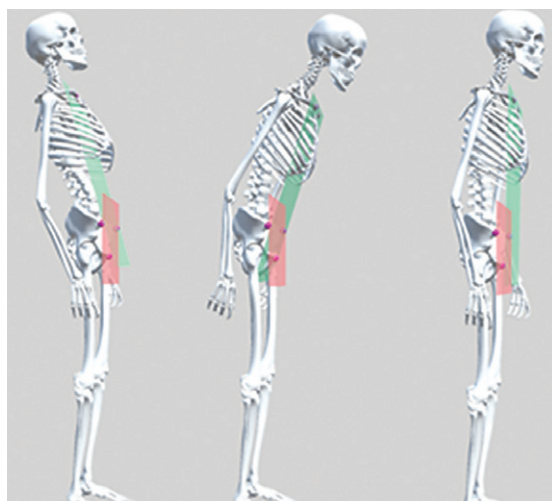


Figure 5. The defined planes for the measurements: The Sternum Tilt Plane (green) is used to determine the upper body inclination. The Anterior Pelvic Plane (red) is used to determine pelvic rotation

Since the incisura jugularis is the highest point of the sternum and easily recognizable by the ultrasound measurement, it is recorded as the fourth landmark. A plane between the ASIS and the IJ is spanned. The angle of this plane, relative to the vertical plane, is defined as Sternum Tilt (ST) and evaluates the upper body inclination. Based on ST, the general posture of the subjects can be determined, and misalignments can be detected. In our ultrasound measurement method, the condition of the spine is evaluated with the help of the upper body inclination.

MEASUREMENT PROCEDURE

The study includes 10 subjects (five men, five women) at the age between 24 and 30. One additional fe-male subject has an unrecognizable scoliosis. The other subjects have no known preexisting diseases. It is therefore assumed that the subjects have a healthy alignment due to their age. Each subject was examined in standing position. The foot distance was about 20 cm and the head was aligned forward. For each subject, the measurement was repeated five times.

Additional to the study and in order to investigate the influence of different upper body alignments, on one subject two further test cases were examined, see Fig. 7. The regular measurements were done in an upright stand (a). In addition, a measurement was carried out in such a way that the subject was first examined with a hyperlordotic alignment (maximum anterior rotated pelvis and posterior inclined upper body) (b). Subsequently, the subject stood with an anterior maximum inclined upper body (c). These test cases were repeated three times. The ul-

trasound probe was always held by the same user to minimize the deviation.

RESULTS

The data in standing position are analyzed differentiated by sex. In the evaluation, the measured values are defined as negative, when the pelvis or the trunk rotates anterior. A posterior rotation or inclination is defined as positive.

Fig. 6 shows the ST and PT distribution on the young subjects (dots: male, triangles: female). Overall, the results show a ST between -3° and 7° and a PT between -14° and 8° .

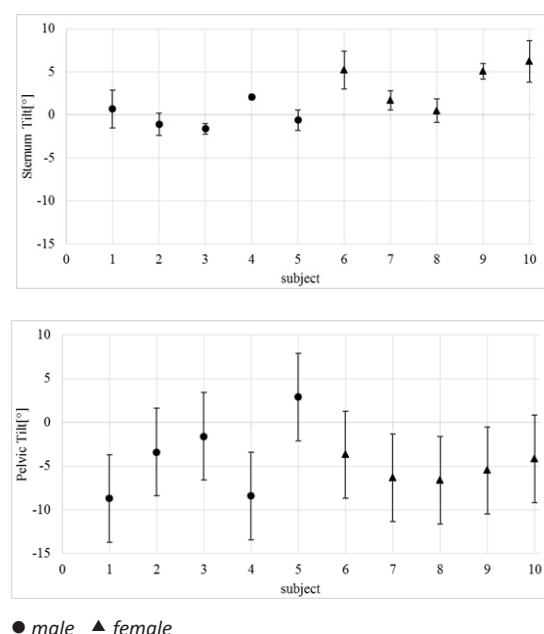
There are no guidelines in literature to determine a pathological and a healthy status of the Sternum Tilt. Based on the measurements of young subjects, a first definition of a healthy range for the Sternum Tilt can be made.

The mean values for the Sternum Tilt are $-0.1 \pm 1.5^\circ$ for male and $3.7 \pm 2.5^\circ$ for female.

The mean values for the Pelvic Tilt are $2.9 \pm 3.1^\circ$ male for male and $-5.3 \pm 1.9^\circ$ for female.

Fig. 7 shows the three body alignments of the test cases. If the test person stands in the hyperlordosis (b), the pelvis rotates anterior and the upper body rotates accordingly posterior. Subsequently, the subject stands with anterior maximum inclined upper body (c).

Consistent with Fig. 7 the following Fig. 8 shows quantitatively the relationship between Pelvic Tilt and Sternum Tilt in these postures (dots: (a), rectangle: (b), triangle: (c)).



● male ▲ female

Figure 6. Results of the measurement. Subjects 1 to 5 are male (dots), 6 to 10 are female (triangles). On the top the Sternum Tilt is shown, on the bottom the diagram shows the results for Pelvic Tilt



Figure 7. Additional cases of different postures

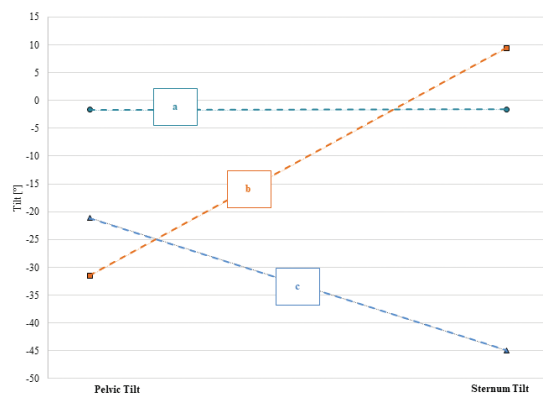


Figure 8. Pelvic Tilt and Sternum Tilt in the three different postures, (a) is in straight posture, (b) in hyperlordosis and (c) with straight legs and maximum anterior upper body inclination

In test case (a) the value of PT is -1.64° and of ST is -1.56° . For the posture (b), the PT increases compared to the previous results in posture (a) to compensate the hyperlordosis. Posture (c) has the maximum anterior ST compared to the postures (a) and (b).

One female volunteer with scoliosis is excluded from the study of symptom-free subjects and is not considered for the new proposed reference values for anterior sagittal balance due to her pathological alignment. Noticeable in her results is a significant anterior Pelvic Tilt. The mean value of her Pelvic Tilt is $-29.7 \pm 3.2^\circ$ and the value of the Sternum Tilt is $6.48 \pm 1.4^\circ$.

DISCUSSION

Spino-pelvic alignment is one of the most important parameter of a healthy spine. The correlation between PI, SS, PT and lumbar lordosis has been sufficiently proven, especially in asymptomatic individuals [15]. However, there is a wide range of normal values of the parameters of spino-pelvic balance and different for each individual because it depends on the shape of the pelvis, sacrum and sacro-iliac joints. The anatomy of the pelvis has not

changed since the end of bone ossification, so it has remained constant in adult. The anatomy of pelvis is expressed by the Pelvic Incidence and its correlation with the sacral slope and lumbar lordosis [16]. As a result, the value of lumbar lordosis in a young, healthy person is characteristic for him, however, it changes with age or disease. Pelvic Tilt or pelvic rotation is normal spino-pelvic parameter [17]. PT can change and in result is a compensatory mechanism that occurs during the degenerative process or aging. Maintaining or restoring the existing spino-pelvic balance is a main goal in spine surgery, especially fusion [18].

Based on the results of the measurements on asymptomatic young subjects, a new proposal for reference values is made.

To determine the sagittal balance, first the Sternum Tilt is considered. The method of creating a sternum plane with one additional landmark incisura jugularis and left and right superior iliac spina that are also used for the anterior pelvic plane, is an easy extension of the method described by Martin et al [10]. The measured mean values of the Sternum Tilt are $0.1 \pm 0.7^\circ$ (male) and $3.7 \pm 1.2^\circ$ (female). The measured values show a difference between male and female subjects. The Sternum Tilt for asymptomatic young male subjects is approximately 0° .

In this study the Pelvic Tilt of the Anterior Pelvic Plane was also measured. The PT values were in a range of $-3.3 \pm 2.3^\circ$ for male subjects and $-5.0 \pm 1.7^\circ$ for female subjects. All subject had a comparable outcome to the values measured by Marques et al [19-21], who measured the Pelvic Tilt with the same components on symptom-free young subjects. Due to their age, health condition and correct posture, all subjects involved in the study are supposed to have a neutral sagittal balance.

Regarding to the three test cases, the scoliosis patient belongs to case (b) due to her Sternum Tilt of 6.48° , which is in the defined range, and a pathological pelvic rotation of -29.7° [22]. It is suspected that in this case, the pelvic rotation balanced the anterior Sternum Tilt to prevent an uncompensated sagittal posture. It is expected that unlike the young scoliosis patient, old people no longer have the flexibility by rotating the pelvis to balance the spinal disorder. Then a Sternum Tilt out of range can be problematic and immediately lead to an imbalance.

The examined young women shows a significant larger posterior Sternum Tilt compared the male group. A statistical T-test shows that there is a difference in the Sternum Tilt between young men and young women ($P = 0.03$). In the study according to Smith [23], the posture of 766 adolescents was measured using motion analysis. The evaluation shows that in the group of men, a significantly higher

proportion of subjects has a flat posture. A study by Michiel et al [24]. Found that women have a different form of the spine. The female spine tilts more posterior in the sagittal plane than the men's. The results of this work are comparable with the literature. The definition of Sternum Tilt correlates with an additional load on the lower spine and pelvis. Many literature sources have shown that women suffer more frequently from hip problems [25].

When considering the standard deviation of the measurement results between 1.5° and 3.1° , it becomes clear that there is a significant variance. One reason for this may be that the subject is moving during the measurement because there is a dynamically balanced area standing upright. The concept of the dynamical standing is called Pendulum [26].

However, comparing the measured values with the literature, the new method provides reasonable results [22, 24, 25].

CONCLUSION

The new measurement approach of the sagittal balance has the potential to evaluate the upright posture in the sagittal plane. On the one hand, the system provides a diagnostic tool to capture the status of the sagittal balance. On the other hand, it is applicable for long-term monitoring after surgery without health risks. The measuring method achieves a new approach for measuring sagittal balance parameters by considering the Sternum Tilt and Pelvic Tilt without any radiation exposure for the patient. First measurements in symptom-free young subjects also showed a difference between male and female probands. This can be a result of the different anatomy between male and female. However, this needs to be investigated in a larger test group.

REKLAMA



Roboty w służbie medycyny



RobinHeart

polski produkt, współpraca
FRK - Meden-Inmed

Vertimo Hi-Lo Step

polski produkt, współpraca
PIAP - Meden-Inmed



REFERENCES

- [1] Vaz G, et al., Sagittal morphology and equilibrium of pelvis and spine, *Eur Spine J.* 2002 Feb; 11(1): 80–87.
- [2] Schenk S, Die sagittale Balance der Wirbelsäule und ihre Bedeutung in der Chirurgie. *Orthopädie & Traumatologie* 2013.
- [3] Miles JD, The pelvis, an intercalary bone. 1522 ed. Monograph of GES. 1522.
- [4] Lazennec JY, et al., Lumbar-pelvic-femoral Balance on Sitting and Standing Lateral Radiographs, *Or-thop Traumatol Surg Res.* 2013 Feb; 99(1 Suppl):S87-103.
- [5] Mehta VA, et al., Implications of spinopelvic alignment for the spine surgeon. *Neurosurgery*, 2012. 70: p. 07-21.
- [6] Le Huec JC, et al., Equilibrium of the human body and the gravity line: the basics, *Eur Spine J.* 2011 Sep; 20(Suppl 5): 558–563.
- [7] Dubousset J, et al., A New 2D and 3D Imaging Approach to Musculoskeletal Physiology and Pathology with Low-Dose Radiation and the Standing Position: The EOS System. *Bull Acad Natl Med.* 2005 Feb; 189(2):287-97; discussion 297-300.
- [8] J.Y. Lazennec, et al., Pelvis and total hip arthroplasty acetabular component orientations in sitting and standing positions: Measurements reproducibility with EOS imaging system versus conventional radiographies. *Orthopaedics&Traumatology: Surgery&Research*, 2011: p. 373-380.
- [9] Daniol M, Master Thesis, Development, calibration, validation and comparison of mobile medical localizers based on smartphones Apple iPhone 5s and Samsung Galaxy S4. *Przegląd Elektrotechniczny*: p. 53-56.
- [10] Martin T, et al., A smart device based measuring system for Pelvic Tilt computation in hip arthroplasty. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2016. 92(3): p. 26-29.
- [11] Buckland A, et al., Sagittal Pelvic Orientation a Comparison of Two Methods of Measurement, *Bull Hosp Jt Dis* (2013) 2017 Dec; 75(4):234-240.
- [12] Suzuki H, et al., Correlation of Tilt of the Anterior Pelvic Plane Angle with Anatomical Pelvic Tilt and Morphological Configuration of the Acetabulum in Patients with Developmental Dysplasia of the Hip: A Cross-Sectional Study, *J Orthop Surg Res.* 2019 Oct 17; 14(1):323.
- [13] Ferraris L, et al., Hempfing, Die Bedeutung der sagittalen Balance in der Wirbelsäulenchirurgie. *Deutscher Ärzte-Verlag*, 2012.
- [14] Legaye J., Analysis of the Dynamic Sagittal Balance of the Lumbo-Pelvi-Femoral Complex, in *Biomechanics in Applications*. 2011.
- [15] Vaz G, et al., Sagittal morphology and equilibrium of pelvis and spine, *Eur Spine J.* 2002 Feb; 11(1): 80–87.
- [16] Legaye J, et al., Pelvic incidence: a fundamental pelvic parameter for three-dimensional regulation of spinal sagittal curves, *Eur Spine J.* 1998; 7(2):99-103.
- [17] Le Huec JC, et al., Pelvic Parameters: Origin and Significance. *European Spine Journal* : Official Publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, European Section of the Cervical Spine Research Society 20 (August 2011): 564–71. doi:10.1007/s00586-011-1940-1
- [18] Głowacki M, et al., Importance of Radiological Evaluation of Global Spinal Balance Together with Lower Limb Alignment in Planning Lumbar Spine Deformity Surgery - Illustrative Case Presentation. *Pol J Radiol.* 2017; 82: 287–292.
- [19] Marques CJ, et al., Intra- and Inter-rater Reliability of Navigated Ultrasound in the Assessment of Pelvic Tilt in Symptom-Free Young Adults. *Journal of Ultrasound in Medicine* 2018.
- [20] Marques CJ, et al., The Effects of Body Position on Pelvic Tilt Angles Measured with a Smartphone-Based Navigated Ultrasound System in Symptom-Free Young Adults. *Journal of Functional Morphology and Kinesiology*, 3(1), 2018.
- [21] Marques CJ, et al., Intra- and Inter-rater Reliability of Navigated Ultrasound in the Assessment of Pelvic Tilt in Symptom-Free Young Adults. *Journal of Ultrasound in Medicine*.
- [22] Kochman A, et al., Preoperative Ultrasonographic Assessment of the Anterior Pelvic Plane for Personalized Total Hip Replacement. *Ultrasound Med*, 2017. 00.
- [23] Smith A, et al., Classification of Sagittal Thoraco-Lumbo-Pelvic Alignment of the Adolescent Spine in Standing and Its Relationship to Low Back Pain. *SPINE* 2008. 33(19).
- [24] Michiel MA, et al., Differences in Male and Female Spino-Pelvic Alignment in Asymptomatic Young Adults. *SPINE*, 2009. 34: p. E826-E832.
- [25] Kennedy D, et al., Comparison of Gender and Group Differences in Self-Report and Physical Performance Measures in Total Hip and Knee Arthroplasty Candidates. *The Journal of Arthroplasty* 2002. 17: p. 70-77
- [26] Gagey PM, et al., Two mechanical models for postural stabilization: the Tactics of the Center of Gravity and the Tactics of the Center of Pressure.

KOMENTARZ RECENZENTA...

Prof. dr hab. Zbigniew Paszenda, Politechnika Śląska

Analizowana praca dotyczy zagadnień związanych z deformacją kręgosłupa. W sposób szczególny ukierunkowana została na problematykę przywrócenie równowagi strzałkowej i harmonii spinopelwicznej w ramach leczenia chirurgicznego. Autorzy pracy zaproponowali zastąpienie powszechnie stosowanej metody z wykorzystaniem promieniowania rentgenowskiego. W pracy zaprezentowano nowe podejście do pomiaru równowagi strzałkowej za pomocą nawigowanego systemu ultradźwiękowego bez narażenia pacjentów na oddziaływanie promieniowania rentgenowskiego. Autorzy pracy założyli, że przednia płaszczyzna miednicy i nowo zdefiniowana płaszczyzna mostka zapewniają ocenę równowagi strzałkowej. W pracy przedstawiono wyniki uzyskane na grupie badawczej wynoszącej 10 pacjentów. Zaprezentowanym w pracy efektem zrealizowanych pomiarów jest propozycja klasyfikacji równowagi strzałkowej, która określa zakres prawidłowych wartości kątowych przechyłu mostka.

Dr hab. n med. Sławomir Grzegorzczyn, Śląski Uniwersytet Medyczny

An important field of research in medicine is the replacement of invasive methods with less invasive. Authors of the article propose to introduce the ultrasound method to study the geometry of spinal „deformations” at equilibrium instead of the conventional radiography. If this method will be improved, advantage can be expected due to the cost of the examination, but more importantly due to the patient being not exposed with an X-ray. The proposal is interesting and, I think, further comparative research of these methods will allow to compare the accuracy obtained in these methods and decide whether the new method will complement or replace the previous one.

Algorytmy sterowania admitancyjnego i impedancyjnego w robotach medycznych

Admittance and Impedance Control Algorithms in Medical Robots

Artykuł recenzowany

Streszczenie

W pracy przedstawiono zaimplementowane sterowanie admitancyjne i impedancyjne w systemie robotycznym, który może być wykorzystany w zabiegach chirurgicznych w środowisku laboratoryjnym. System ten składa się z robota KUKA LWR oraz konsoli haptycznej Force Dimension Omega 7. W ramach prowadzonych prac badawczych przeprowadzono szereg badań eksperymentalnych weryfikujących zastosowane algorytmy sterowania.

Abstract

This paper presents implemented admittance and impedance control in a robotic system that can be used in surgical procedures in a laboratory environment. This system consisted of a KUKA LWR robot and Force Dimension Omega 7 haptic console. As part of the research, a number of experimental studies were carried out to verify the control algorithms used.

**PIOTR SAUER^{1*},
TOMASZ KRZYKOWSKI²**

¹Institut Automatyki i Robotyki,
Politechnika Poznańska,
60-965 Poznań, ul. Piotrowo 3a
²CUBE SYSTEMS Sp. z o.o.
ul. Św. Michała 58, Poznań

* piotr.sauer@put.poznan.pl

Słowa kluczowe:

robot medyczny, konsola haptyczna,
sterowanie admitancyjne, sterowanie
impedancyjne, chirurgia wspomagana
komputerowo, chirurgia robotyczna.

Keywords:

medical robot, haptic console,
admittance control, impedance control,
computer-assisted surgery, robotic
surgery.

WPROWADZENIE

Gwałtowny rozwój inżynierii biomedycznej i biocybernetyki przyczynił się do opracowania nowych metod leczenia i diagnostyki medycznej opartej na obrazowaniu medycznym.

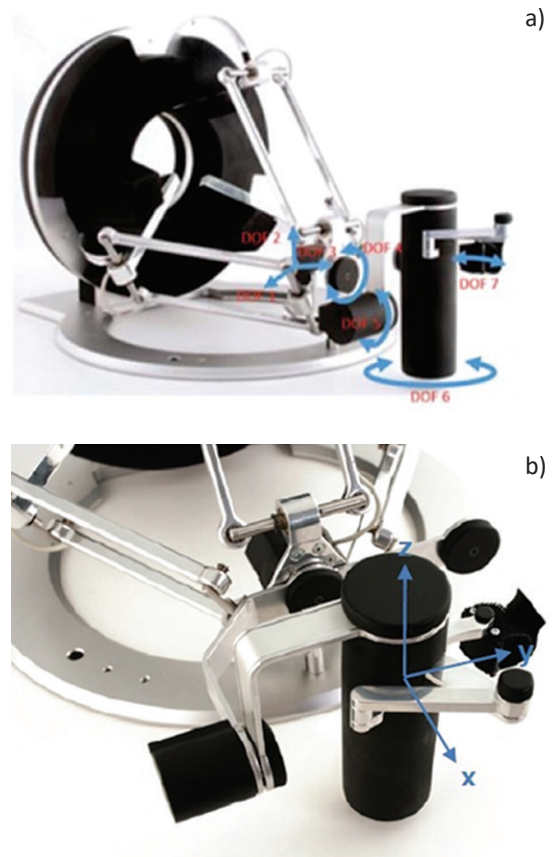
Połączenie nowoczesnych technik obrazowania z systemem nawigacyjnym przyczyniło się do powstania chirurgii wspomaganej komputerowo (CAS – ang. *Computer Assisted Surgery*) [1, 2, 3]. Rozwój technologii i metod operacyjnych przyczynił się do wprowadzenia technik małoinwazyjnych, które z jednej strony umożliwiają skrócenie czasu hospitalizacji po zabiegu a z drugiej strony są trudniejsze do opanowania przez lekarza. Jedną z takich technik jest chirurgia laparoskopowa określana również jako chirurgia minimalnie inwazyjna (MIS – ang. *Minimally Invasive Surgery*). Jest ona techniką operacyjną, w której chirurg nie kontaktuje się bezpośrednio z operowaną tkanką lecz obserwuje pole operacji na ekranie monitora. Rozwój informatyki

umożliwił opracowanie nowej odmiany chirurgii laparoskopowej określanej mianem „telechirurgii”, w której uzyskany obraz mógł być przesyłany na odległość. Zastosowanie „telechirurgii” umożliwiło częściowe rozwiązanie problemu rosnącego zapotrzebowania na specjalistyczną pomoc medyczną, która wynika ze zbyt małej ilości lekarzy oraz personelu medycznego. Początkowo „telechirurgia” była techniką pasywną czyli umożliwiała przeprowadzanie konsultacji medycznych na odległość. Kolejny rozwój inżynierii dał możliwość chirurgom aktywnego uczestniczenia w operacji na odległość przy pomocy robotów chirurgicznych (RAS – ang. *Robotically Assisted Surgery, Robotic Surgery*) [3, 4, 5, 6]. Szczegółowo zaplanowany ruch i zwiększona dokładność prowadzenia narzędzia przez roboty sprawia, że leczenie jest bezpieczniejsze a czas hospitalizacji po zabiegu krótszy [7]. W ostatnich latach na podstawie raportu [7] widać znaczący wzrost zainteresowania robotyką medyczną. Jednak należy pamiętać, że lic-

ne korzyści płynące z zastosowania robotów są ściśle zależne od umiejętności prawidłowego i pełnego wykorzystania sprzętu przez operatora. Doświadczeni lekarze niechętnie rezygnują z wyćwiczonych i sprawdzonych metod tradycyjnych, na rzecz odmiennych w sterowaniu, a czasem nawet nieintuicyjnych metod sterowania robotem. Wykonywanie zabiegu przy wykorzystaniu robotów chirurgicznych wymaga nauczania się sterowania narzędziem z wykorzystaniem ograniczonych bodźców zmysłowych. Jednym ze zmysłów ograniczanych przez konstrukcję robota i zadajnika ruchu jest zmysł dotyku. Faktura, twardość i sprężystość badanej tkanki, są kluczowymi cechami, wpływającymi na ocenę stawianą przez lekarza. Odwzorowanie tych cech jest możliwe, jeśli zastosowany zostanie specjalny zadajnik haptyczny, czyli taki, który umożliwia oddziaływanie siłą na rękę operatora. W celu uzyskania efektu zmysłu dotyku, interakcję narzędzia chirurgicznego (np. skalpela) z otoczeniem (np. tkanką pacjenta) opisuje się modelem masa-sprężyna-tłumik. Model ten umożliwia przedstawienie sprężystości i tłumienia nacisku narzędzia na tkankę. Wykorzystuje się go w odpowiednim algorytmie sterowania, który łączy sterowanie pozycyjne ze sterowaniem siłowym. W prezentowanej pracy zaproponowaliśmy dwa algorytmy sterowania: sterowanie admitancyjne i impedancyjne. Algorytmy te zostały zaimplementowane w systemie robotycznym składającym się z robota KUKA LWR 4+ i konsoli haptycznej Force Dimension Omega 7. Następnie przedstawione w pracy algorytmy zostały zweryfikowane w warunkach laboratoryjnych.

■ KONSOLA HAPTyczna OMEGA 7

Konsola haptyczna Omega 7 firmy Force Dimension (Rys. 1) jest precyzyjnym zadajnikiem ruchu z możliwością zaimplementowania sprzężenia siłowego. Zapewnia operatorowi instynktowną i bezpieczną pracę. Charakteryzuje się siedmioma stopniami swobody oraz układem dla prawo- i leworęcznych użytkowników [8,9]. Można połączyć oba kontrolery w jeden system i wykorzystać pełnię możliwości interfejsów haptycznych. Konsola została zbudowana na bazie kinematyki równoległej połączonej z dołączonym ruchomym nadgarstkiem (efektorem) oraz chwytakiem ze sprzężeniem siłowym. Zadajnik został wyposażony w trzy złącza pasywne (ruch w nadgarstku) oraz cztery złącza wyposażone w silniki (tzw. złącza aktywne, trzy złącza związane z kinematyką równoległą - pozycja końcówki narzędzia, a czwarte złącze aktywne umożliwia otwieranie i zamykanie narzędzia). Wszystkie złącza posiadają sprzężenie enkoderowe umożliwiające dokładne śledzenie zadawania ruchu. Zastosowanie czterech złącz aktywnych pozwala zrealizować sprzężenie siłowe od pozycji końcówki narzędzia oraz od stop-



Rysunek 1. Konsola haptyczna Omega 7: a) widok konsoli, b) efektor z układem bazowym. [9, 10]

Figure 1. Omega 7 haptic console: a) console view, b) an effector with a base system. [9, 10]

nia otwarcia narzędzia. Efektor konsoli został zrealizowany jako połączenie par przegubowych, które umożliwiają odwzorowanie naturalnego ruchu ludzkiego nadgarstka. Wysoka sztywność mechaniczna połączona z pracującym w czasie rzeczywistym kontrolerem USB 2.0 pozwala na generowanie sygnałów wykonawczych dla silników urządzenia z częstotliwością osiągającą nawet 4kHz. Właściwości konsoli haptycznej umożliwiają jej zastosowanie w projektach z takich dziedzin jak [8]:

- robotyka medyczna i lotnicza,
- mikro- i nanomanipulatory,
- konsole teleoperacyjne,
- wirtualne symulatory,
- systemy treningowe.

Konsola haptyczna Omega 7 charakteryzuje się następującymi parametrami [8,10]:

- przestrzeń robocza: $\phi 160 \times 110$ mm, obrót: $240 \times 140 \times 180^\circ$, szczypce: 25 mm,
- maksymalna siła: 12 N, szczypce: ± 8 N,
- rozdzielczość: $<0,01$ mm, obrót: $0,09^\circ$, szczypce: 0,006 mm,
- sztywność: 14,5 N/mm,

■ ROBOT KUKA LWR 4+

Robot KUKA LWR (Lightweight robot) jest nową generacją robotów manipulacyjnych wyposażonych w sterowanie momentem. Powstał on jako rezultat współpracy Instytutu Robotyki i Mechaniki (German Aerospace Center – DLR) z firmą KUKA Roboter GmbH. W odróżnieniu od klasycznych robotów przemysłowych, robot KUKA LWR jest lekkim elastycznym robotem o 7 stopniach swobody (Rys. 2), który posiada następujące własności:

- bardzo dobry współczynnik wagi robota do masy przenoszonego ładunku, robot KUKA LWR 4+ jest przeznaczony do przenoszenia ładunku o masie 7 kg, sam waży 15 kg,
- generowanie ruchu robota, w celu osiągnięcia zadanej pozycji zdefiniowanej w przestrzeni kartezjańskiej lub przestrzeni złącz,
- możliwość symulowania sprężyn ze zmienną sztywnością zarówno w przestrzeni złącz jak i w przestrzeni kartezjańskiej,
- kompensacja wpływu grawitacji, robot przenosi swój własny ciężar i może być przesuwany pod wpływem działania sił zewnętrznych na ramię robota (możliwość ręcznego prowadzenia robota),
- estymacja zewnętrznych sił i momentów działających na chwytak robota oraz każde jego złącze,
- sterowanie z kontrolą położenia, prędkości i momentu obrotowego. Pomiar pełnego stanu we wszystkich złączach wykonywany jest w cyklu 3 kHz.

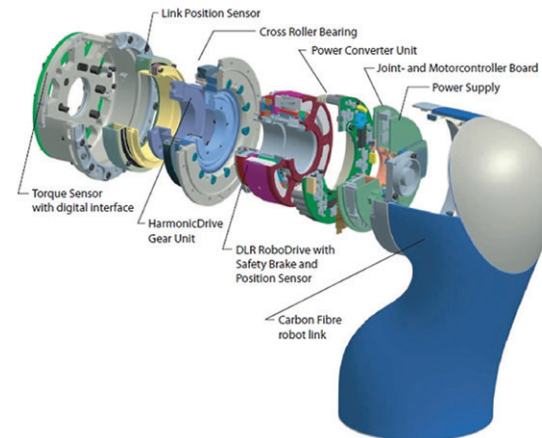
Dzięki w/w własnościom uzyskano dynamiczny system z aktywnym tłumieniem drgań, który może pracować w bezpośrednim kontakcie z człowiekiem. Robot ten zbudowany jest z „inteligentnych” modułów (złącz), w które wbudowano systemy elektroniczne w tym również systemy pomiarowe. Każde złącze robota wyposażono w następujące elementy (Rys. 3) [12]:

- bezszczotkowy silnik DC z zintegrowanym mostkiem mocy oraz elektromagnetycznymi hamulcami,
- przekładnię harmoniczną,
- czujnik położenia wału silnika (enkodery magnetooporowe),
- czujnik położenia złącza (potencjometry),
- czujnik momentów sił, który montowany jest na elastycznym elemencie przekładni harmoniczej. Błąd czujnika wynosi poniżej 0,5% i zastosowano filtr dolnoprzepustowy przy 600Hz,
- zasilacz,
- płytę sterownika zawierającą dwa procesory sygnałowe DSP, pierwszy (TMS320VC33) odpowiedzialny jest za komunikację z zewnętrznym sterownikiem robota, obsługuje czujników



Rysunek 2. Robot KUKA LWR 4+ ze sterownikiem i panelem KCP (KUKA Control Panel) [11]

Figure 2. KUKA LWR 4+ robot with controller and KCP panel (KUKAControl Panel) [11]



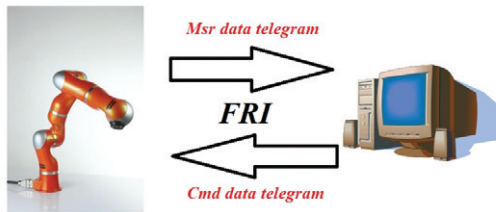
Rysunek 3. Moduł napędowy robota KUKA LWR 4+ [12]

Figure 3. KUKA LWR 4+ robot drive module [12]

oraz wyznaczanie aktualnych poleceń dla procesora silnika, drugi (DSP56F807) jest sterownikiem silnika, oblicza pozycję i prędkość silnika, umożliwia pomiar temperatury, prądu pobieranego przez silnik oraz obsługuje sygnały z czujników Halla zamontowanych w silniku,

- cienkie łożyska toczne.

System sterowania umożliwia wykorzystanie funkcji ze sterownika KUKA i zintegrowanego języka skryptowego KRL (KUKA Robot Language) podobnie jak w przypadku robotów przemysłowych firmy KUKA. Język programowania KRL został rozszerzony o funkcje takie jak kontrola impedancji (nie jest dostępna dla standardowych robotów). W sterowniku robota zastosowano interfejs FRI (ang. *the Fast Re-*



Rysunek 4. Zastosowanie interfejsu FRI (komunikacja między sterownikiem robota, a zewnętrznym komputerem)

Figure 4. Application of FRI (communication between robot controller and external computer)

search Interface), który umożliwia dostęp do sterowania robotem na tzw. niskim poziomie z częstotliwością 1 kHz [11]. Interfejs FRI umożliwia połączenie sterownika robota z aplikacją zaimplementowaną na zewnętrznym komputerze z dowolnym systemem operacyjnym dzięki zastosowaniu protokołu internetowego UDP (ang. *User Datagram Protocol*) – Rys. 4.

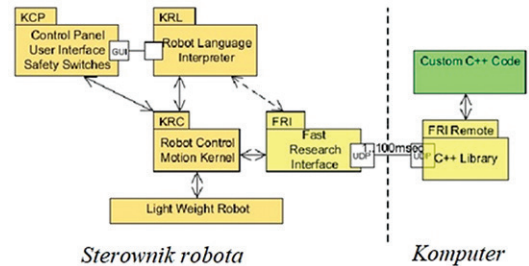
Komunikacja między sterownikiem robota, a zewnętrznym komputerem wykorzystuje dwa telegramy [13]:

- **Msr data telegram** – zawiera informacje o stanie robota (np. *Robot state* – informacja o robocie) oraz wartości mierzone (np. *Robot data* – zmierzona pozycja w złączach lub w układzie kartezjańskim), telegram wysyłany jest ze sterownika robota do komputera,
- **Cmd data telegram** – zawiera nagłówek informacji (zgodny z UDP), informację o wybranym trybie pracy (np. instrukcje interfejsu FRI) oraz informacje niezbędne dla języka KRL (np. wartość zadania pozycji w złączach lub w układzie kartezjańskim). Telegram przesyłany z komputera do sterownika robota.

Interfejs FRI zapewnia również normalne funkcjonowanie kontrolera robota KUKA czyli [11]:

- standardowe programowanie i obsługę robota,
- realizację standardowych poleceń ruchu takich jak LIN/PTP/CIRC,
- wybór trybów sterowania (sterowanie pozycją lub impedancyjne),
- pełne działanie systemów bezpieczeństwa,
- współpracę z magistralą I/O,
- korzystanie z wbudowanego w sterownik języka KRL (ang. *KUKA Robot Language*).

Współpraca między sterownikiem robota a aplikacją na komputerze PC umożliwia użytkownikowi pełną autonomię. Z punktu widzenia użytkownika sterowanie robotem, wybór trybu sterowania, edytowanie i wykonywanie programów (skryptów) napisanych w języku KRL. Jądro systemu sterowania ruchem robota KUKA dostarcza różnych metod generowania trajektorii ruchu (PTP, LIN, CIRC) za



Rysunek 5. Architektura systemu sterowania z interfejsem FRI [11]

Figure 5. Architecture of the control system with FRI interface [11]

pomocą prostych komend języka KRL. Interfejs FRI umożliwia bezpośrednie oddziaływanie na jądro systemu sterowania ruchem. Generowana trajektoria przesyłana jest do komputera PC, gdzie może być modyfikowana przez użytkownika. Za pomocą FRI użytkownik może również modyfikować parametry sztywności i tłumienia niezbędne dla sterowania impedancyjnego lub wymagane momenty sił w poszczególnych złączach. W tym celu część interfejsu uruchamiana jest w sterowniku robota KUKA, a od strony użytkownika dostępna jest biblioteka FRI zawierająca odpowiednie funkcje sterujące zaimplementowane za pomocą języka C++ (Rys. 5).

ALGORYTMY STEROWANIA PORÓWNANIE STEROWANIA IMPEDANCYJNEGO I ADMITANCYJNEGO

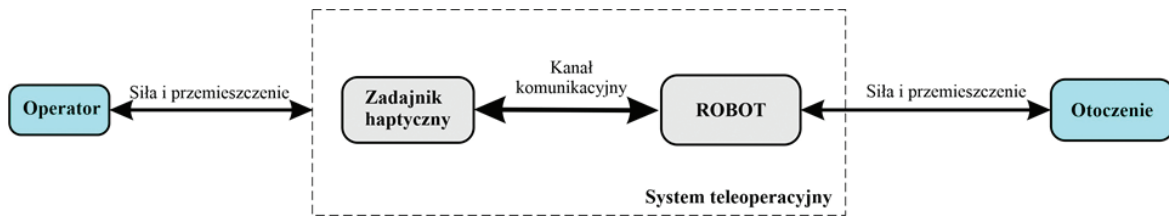
W chirurgii robotycznej wykorzystuje się systemy teleoperacyjne, w których ruch zadawany przez operatora (lekarza) działającego na zadajnik jest przesyłany odpowiednim kanałem komunikacyjnym do elementu wykonawczego (robota medycznego). Na rysunku 6 przedstawiono schemat blokowy systemu teleoperacyjnego. W nowoczesnych systemach teleoperacyjnych wykorzystuje się specjalne zadajniki ruchu (tzw. zadajniki haptyczne), które wykorzystują siłowe sprzężenie zwrotne aby operator mógł odczuwać kontakt narzędzia chirurgicznego z operowaną tkanką. Aby było to możliwe należy rozwiązać problem połączenia sterowania położeniem narzędzia z oddziaływaniem tego narzędzia na otoczenie (np. operowaną tkankę).

Jeżeli założymy że narzędzie robota porusza się w środowisku punktów inercyjnych, które reprezentowane są za pomocą masy m , a współczynników sprężystości k i tłumienia c określają właściwości kontaktu narzędzia robota z otoczeniem to otrzymujemy układ mechaniczny [14]. Układ ten można opisać następującym równaniem:

$$f = m\ddot{x} + c\dot{x} + kx \quad (1)$$

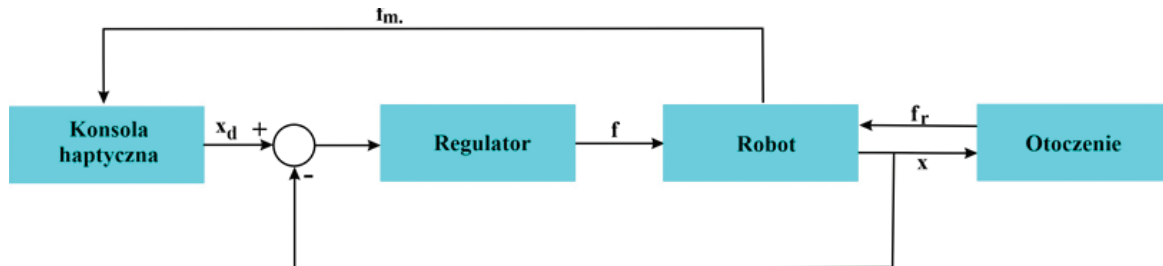
gdzie: f – siła działająca na układ mechaniczny,

x – przemieszczenie układu mechanicznego,



Rysunek 6. Schemat blokowy systemu teleoperacyjnego

Figure 6. Block diagram of the teleoperational system



Rysunek 7. Schemat blokowy sterowania admitancyjnego (gdzie: f – regulowana wartość siły, f_r – siła reakcji otoczenia na przemieszczenie narzędzia, f_m – siły działające na narzędzie robota wyznaczone na podstawie danych z układów pomiarowych robota, x_d – zadana wartość przemieszczenia narzędzia robota, x – wyjściowe przemieszczenie narzędzia robota),

Figure 7. Block diagram of admittance control (where: f – control the force, f_r – reaction force to the movement of the tool, f_m – force acting on the robot tool determined on the basis of data from robot measuring systems, x_d – the set value of robot tool displacement, x – robot tool displacement)

- m – masa,
- k – współczynnik sprężystości,
- c – współczynnik tłumienia.

Dla robota znajdującego się w nieznanym środowisku można rozpatrywać dwa przypadki jego oddziaływania na otoczenie:

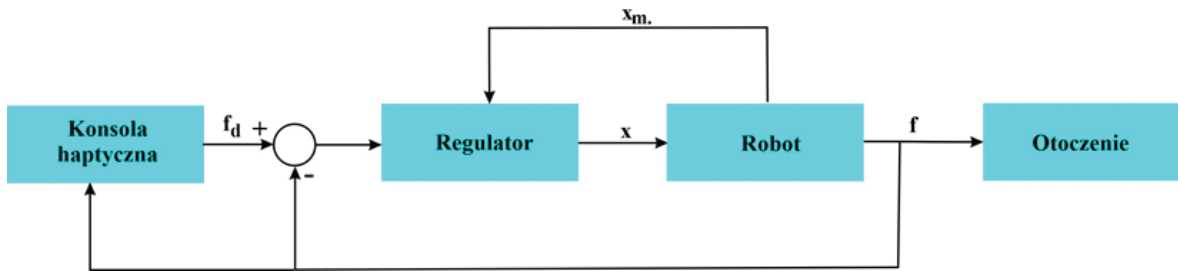
- ramię robota traktowane jest jako sztywny układ mechaniczny, natomiast jego otoczenie jest zbiorem punktów inercyjnych opisanych równaniem (1),
- otoczenie robota traktowane jest jako sztywne punkty, natomiast ramię robota jest układem mechanicznym podatnym, który jest opisany równaniem (1).

Zatem narzędzie zamontowane w chwytaku robota może wywierać siłę na otoczenie lub poruszać się w nim, jednakże nigdy nie można jednocześnie sterować wartością wywieranej siły i wartością przemieszczenia [14, 15]. Jeśli przyjmujemy, że narzędzie robota charakteryzuje się małą inercją, a zadanie wymaga szczególnej kontroli siły z jaką narzędzie działa na otoczenie, wówczas manipulator należy traktować jako obiekt o charakterze impedancyjnym, a środowisko jako zbiór obiektów inercyjnych. Narzędzie robota jest szczególnie wrażliwe na skutki działania siły wynikające z kontaktu z otoczeniem. Regulacja siły interakcji pozwala na pełną kontrolę sił działających w układzie. Kosztem wysokiej jakości regulacji siłowej jest brak bezpośredniego wpływu na przemieszczenie narzędzia w środowisku. Kontrola położenia możliwa jest jedynie pośrednio

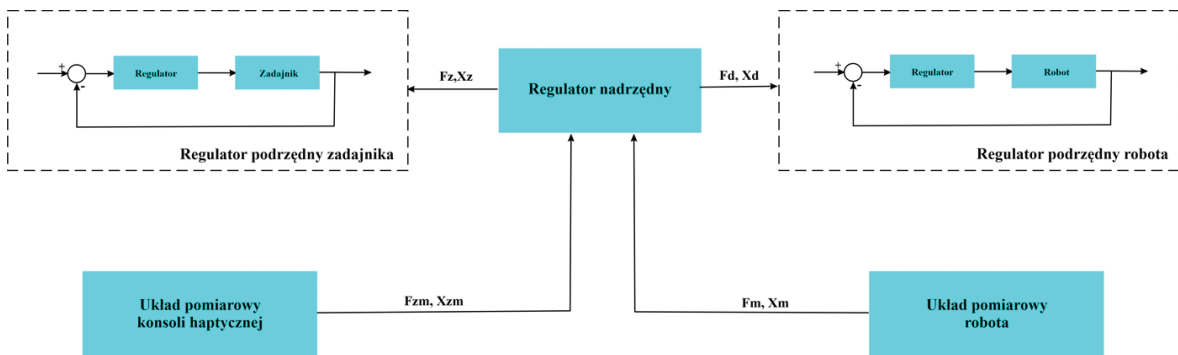
poprzez dodatkowe pętle sprzężenia zwrotnego. Przykładem może być oddziaływanie szczypiec na tkankę miękką podczas operacji laparoskopowej, w którym istotna jest siła oddziaływania narzędzia na ludzką tkankę, a nie jej rzeczywiste dokładne przemieszczenie. Natomiast gdy założymy, że narzędzie charakteryzuje się dużą inercją, a zadanie teleoperacji ma polegać na osiągnięciu konkretnej pozycji, wówczas manipulator należy traktować jako obiekt o charakterze inercyjnym, a środowisko jako obiekt o charakterze admitancyjnym. Podążanie narzędzia za trajektorią zadaną jest możliwe poprzez zastosowanie pętli regulacji pozycji, które uwzględniają jego inercję. Kosztem tego sterowania jest brak możliwości bezpośredniej predykcji siły z jaką manipulator musi oddziaływać na otoczenie, aby osiągnąć zadaną pozycję. Przykładem może być frezowanie kości udowej w celu dopasowania protezy ortopedycznej. W tym przypadku istotne jest dokładne przygotowanie powierzchni kości do kształtu protezy. Dokładność pozycjonowania frezu podczas operacji przekłada się na końcowe efekty dopasowania protezy [16].

Ostatecznie można zdefiniować ogólne dwa typy sterowania:

- **sterowanie admitancyjne** czyli sterowanie pozycyjne, w którym narzędzie manipulatora traktuje się jako obiekt inercyjny. Obiekt ten pod wpływem generowanej w złączach siły przemieszcza się do pozycji zadanej. Regulator na podstawie sprzężenia zwrotnego od aktu-



Rysunek 8. Schemat blokowy sterowania impedancyjnego (gdzie: x – regulowana wartość przemieszczenia narzędzia robota, x_m – zmierzona wartość przemieszczenia narzędzia, f_d – zadana wartość siły oddziaływującej na środowisko)
Figure 8. Block diagram of impedance control (where: x – adjustable value of robot tool displacement, x_m – measured value of tool displacement, f_d – set value of the force affecting the environment)



Rysunek 9. Schemat blokowy sterowania kaskadowego z dodatkowymi układami pomiarowymi (gdzie: F_z – zadana wartość siły, która poprzez efektor konsoli działa na rękę operatora, X_z – zadane przemieszczenie efektora zadajnika, F_{zm}, X_{zm} – wartości siły i przemieszczenia mierzone za pomocą układów pomiarowych zadajnika, F_d, X_d – zadana wartość siły z jaką działa narzędzie na otoczenie, X_d – zadana wartość przemieszczenia narzędzia, F_m, X_m – wartości siły i przemieszczenia mierzone za pomocą układów pomiarowych robota)
Figure 9. Block diagram of cascade control with additional measuring systems (where: F_z – set value of force, which through the console effector works on the operator's hand, X_z – set displacement of the effector, F_{zm}, X_{zm} – values of force and displacement measured by the console system, F_d, X_d – set value of the force with which the tool works on the environment, X_d – set value of tool displacement, F_m, X_m – values of force and displacement measured by robot measuring systems)

alnej pozycji, ustala siłę z jaką robot powinien działać na otoczenie. Bezpośrednią reakcją na przemieszczenie narzędzia manipulatora jest siła reakcji otoczenia. W przypadku systemów teleoperacyjnych siłę reakcji otoczenia odwzorowuje się na siłę z jaką działa efektor konsoli haptycznej na rękę operatora. Rysunek 7 przedstawia schemat blokowy sterowania admitancyjnego.

● **sterowanie impedancyjne** czyli sterowanie siłowe, w którym manipulator działa na zbiór punktów inercyjnych, działających na narzędzie z siłą zależną od ich przemieszczenia. Regulator na podstawie sprzężenia zwrotnego od wywieranej siły, ustala położenie zadane obiektu, tak aby uzyskać nacisk na otoczenie zadaną siłą. Rzeczywiste przemieszczenie narzędzia robota jest zależne od właściwości środowiska, w którym się porusza i nie jest równe zadanej wartości przemieszczenia narzędzia. Na rysunku 8 przedstawiono schemat blokowy sterowania impedancyjnego.

Podsumowując, w sterowaniu admitancyjnym, sprzężenie siłowe stosuje się w celu generowania siły działającej na rękę operatora. Siła ta odwzorowuje opór jaki może pojawić się w czasie oddziaływania narzędzia na otoczenie. W tym przypadku w zadajniku nie jest wymagane aktywne sprzężenie siłowe, można zastosować odpowiedni hamulec do generowania oporów ruchu. Możliwe jest zastosowanie aktywnego sprzężenia siłowego i przenoszenie na zadajnik sił aktywnie działających na efektor w momencie bezruchu. Natomiast w sterowaniu impedancyjnym sprzężenie siłowe stosuje się w celu przenoszenia na zadajnik operatora wszystkich sił działających na narzędzie. Operator pokonując siły generowane przez zadajnik, kontroluje siłę z jaką narzędzie działa na otoczenie. W tym przypadku wymagane jest stosowanie aktywnego sprzężenia siłowego, gdyż siły będące skutkiem interakcji efektora z otoczeniem powinny być przenoszone na konsolę haptyczną tak aby operator mógł odczuwać wszystkie siły działające w układzie.

W praktyce kompletny system sterowania admitancyjnego lub impedancyjnego wymaga kaska-

dowej struktury układu regulacji. W skład ogólnej architektury wchodzi wysokopoziomowy regulator nadrzędny (np. regulator pozycji) oraz regulatory podrzędne, działające na coraz niższych poziomach abstrakcji. Ostatni niskopoziomowy regulator podrzędny zawsze odpowiada za fizyczne działanie sprzętu i odnosi się do konkretnych wartości rzeczywistych takich jak wartości prądu w uzwojeniach silnika i/lub napięcia podawanego na uzwojenia silnika. Regulator nadrzędny wykorzystuje sygnały pomiarowe odpowiednie dla rodzaju sterowania. W przypadku sterowania admitancyjnego podstawowym sygnałem pomiarowym jest pozycja narzędzia, natomiast w sterowaniu impedancyjnym sygnałem podstawowym jest siła działająca na narzędzie. Zatem do prawidłowego działania sterowania a tym samym zadajnika wymagane jest zastosowanie dodatkowych układów pomiarowych. Na rysunku 9 przedstawiono schemat blokowy sterowania kaskadowego dla realizacji zadania teleoperacji. W przedstawionym układzie zastosowano dodatkowe układy pomiarowe.

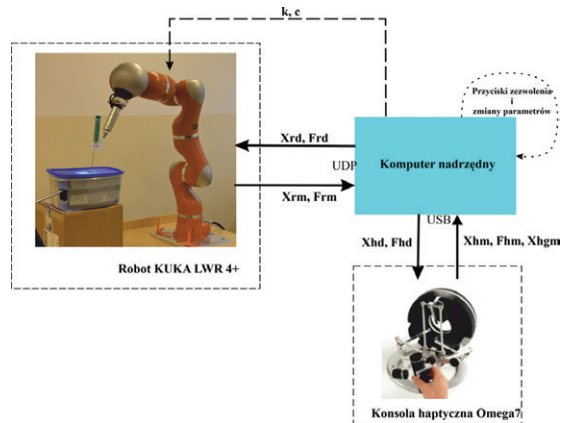
IMPLEMENTACJA ALGORYTMÓW STEROWANIA

Przedstawione powyżej algorytmy sterowania zaimplementowano w laboratoryjnym systemie robotycznym, który symulował działanie robota medycznego. Badania laboratoryjne posłużyły do weryfikacji eksperymentalnej algorytmów sterowania, które można zastosować dla robotów wspomagających przeprowadzanie zabiegów chirurgicznych. Stanowisko laboratoryjne składało się z następujących modułów (Rys. 10):

- konsoli haptycznej Omega 7 firmy Force Dimension,
- robota przemysłowego KUKA LWR4 +,
- komputera, na którym zaimplementowano przedstawione algorytmy sterowania, komputer realizuje również komunikację między robotem a konsolą haptyczną. Do komunikacji między komputerem, a robotem zastosowano protokół UDP wykorzystując bibliotekę FRI. Natomiast do komunikacji między komputerem a konsolą haptyczną wykorzystano interfejs USB oraz bibliotekę FD (Force Dimension Haptic – SDK).

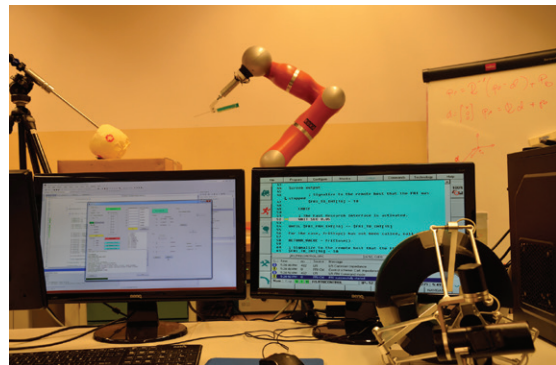
Rysunek 11 przedstawia widok stanowiska laboratoryjnego, na którym testowano zaimplementowane w pracy algorytmy sterowania.

Przedstawione w rozdziale 4.1 algorytmy sterowania zaimplementowano w aplikacji napisanej w języku C++. Aplikację ta pełni rolę mastera, a konsola haptyczna i robot są urządzeniami typu slave. Istnieje możliwość włączania lub wyłączania sprzężenia siłowego odczuwalnego na konsoli haptycznej.



Rysunek 10. Schemat blokowy stanowiska badawczego (gdzie: X_{hd} , F_{hd} – zadane wartości pozycji i siły oddziaływania konsoli haptycznej, X_{hm} , F_{hm} – zmierzone wartości pozycji i siły oddziaływania konsoli haptycznej, X_{hgm} – zmierzona pozycja szczytów konsoli haptycznej, X_{rd} , F_{rd} – zadane wartości pozycji i siły oddziaływania robota, X_{rm} , F_{rm} – zmierzona wartość pozycji i siły oddziaływania robota).

Figure 10. A block diagram of experimental set-up (where: X_{hd} , F_{hd} – set values of the position and force of the haptic console, X_{hm} , F_{hm} – measured values of the position and force of the haptic console, X_{hgm} – measured position of the haptic console pliers, X_{rd} , F_{rd} – set values of the position and force of the robot, X_{rm} , F_{rm} – measured value of robot position and impact)



Rysunek 11. Widok stanowiska laboratoryjnego
Figure 11. View of the experimental set-up.

Podczas pracy przy włączonym sprzężeniu siłowym operator odczuwa siły kontaktu narzędzia z tkanką poprzez siły, które są generowane przez efektor konsoli na rękę operatora. W trakcie pracy istnieje możliwość zmiany właściwości robota za pomocą zmian wartości współczynników sprężystości i/lub tłumienia w poszczególnych złączach. W wyniku zmian wartości w/w współczynników można uzyskać zmianę impedancji lub admitancji całego układu mechanicznego. Sterowanie admitancyjne zrealizowane jest poprzez implementację pętli pozycyjnej, w której wartością zadaną jest aktualna pozycja efektora konsoli haptycznej. Operator na podstawie sprzężenia siłowego działającego na jego rękę steruje pozycją efektora zadajnika. Wyznaczo-

ne wartości zadane są przetwarzane przez aplikację, a następnie przesyłane do robota, w którym realizowany jest dojazd do pozycji zadanej. Jeśli manipulator porusza się w środowisku generującym opory ruchu, wówczas sterownik robota umożliwia pomiar siły oporu w poszczególnych złączach. Następnie w sterowniku robota następuje przeliczenie pomierzonych sił w złączach na siłę oporu działającą na końcówkę narzędzia. Następnie obliczone w sterowniku robota siły zostają odczytane w opracowanej aplikacji i przesłane do konsoli haptycznej.

Sterowanie impedancyjne zostało zrealizowane poprzez implementację pętli siłowej, w której wartością zadaną jest przeskalowana siła zmierzona na konsoli haptycznej. Przy starcie algorytmu efektor konsoli ustawiany jest automatycznie w pozycji centralnej. Jeśli operator odsunie zadajnik z pozycji zerowej, konsola zacznie przeciwdziałać, wywierając siłę w takim kierunku aby efektor zadajnika powrócił do pozycji zerowej. Siła reakcji generowana przez konsolę jest proporcjonalna do wielkości wychylenia efektora od pozycji zerowej. Dzięki takiemu rozwiązaniu operator odchylając zadajnik od pozycji zerowej może zadawać siłę z jaką narzędzie działa na otoczenie. W sterowaniu impedancyjnym narzędzie robota traktowane jest jako punkt nieważki, więc po zadaniu przez operatora ruchu z określoną siłą, narzędzie będzie poruszało się tak długo aż natrafi na przeszkodę, stawiającą opór z siłą równą sile zadanej. Wszystkie siły działające na narzędzie robota są dodawane do siły, która centruje efektor konsoli. Dlatego w przypadku natrafienia na przeszkodę, operator odczuwa na konsoli haptycznej opór stawiany przez przeszkodę. Jeśli narzędzie robota dotyka niepodatnej powierzchni nieruchomej, wówczas siła odchylenia zadajnika haptycznego od pozycji zerowej w kierunku powierzchni nieruchomej będzie rosła do maksimum.

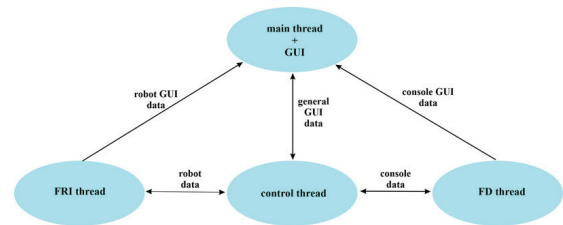
Aplikacja obsługuje następujące wątki:

- *main thread* – wątek główny odpowiada za sterowanie i bezpieczne kończenie pracy wątków pomocniczych oraz obsługuje interfejs użytkownika,
- *FRI thread* – wątek obsługujący komunikację z robotem KUKA LWR,
- *FD thread* – wątek obsługujący komunikację z konsolą haptyczną,
- *control thread* – wątek realizujący pracę regulatora nadrzędnego.

Zależności pomiędzy poszczególnymi wątkami przedstawiono na rysunku 12.

W aplikacji utworzono trzy odrębne klasy:

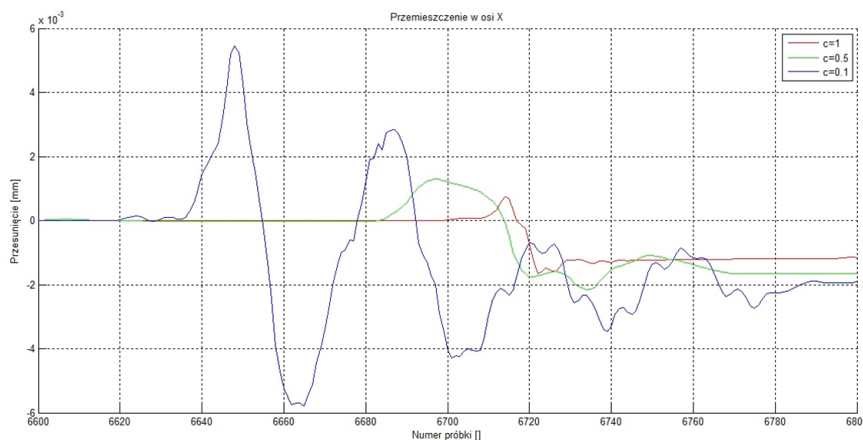
- *Telemanipulation_system* – klasa zawierająca obsługę interfejsu graficznego, metodę *update()* zawierającą główną pętlę programu oraz punkt wejściowy programu czyli metodę *main()*,



Rysunek 12. Relację między poszczególnymi wątkami aplikacji
Figure 12. The relationship between individual application threads

- *FDHandler* – klasa zawierająca obsługę biblioteki *FD SDK*,
- *FRIHandler* – klasa zawierająca obsługę *FRI*.

Aplikacja umożliwiać jednocześnie obsługę wszystkich bibliotek pomocniczych przy zachowaniu regularnej synchronizacji danych między poszczególnymi wątkami programu. Wymagania biblioteki *FRI* dotyczące czasów odpowiedzi programu są bardzo rygorystyczne. Biblioteka *FRI* do komunikacji z robotem KUKA LWR wykorzystuje protokół UDP, który nie umożliwia ciągłego monitorowania połączenia w bieżącej sesji, dlatego konieczne było wykorzystanie dodatkowych mechanizmów do cyklicznego sprawdzania poprawności połączenia z robotem. Ustawiona pętla synchronizacji połączenia między komputerem i robotem zakłada nawiązanie kontaktu między urządzeniami co 1 ms. Aplikacja została napisana w środowisku Windows, który nie jest systemem czasu rzeczywistego, dlatego możliwe jest zaniedbywanie narzuconych programowo czasów odświeżania głównej pętli, jeśli inne aplikacje systemowe uzyskają większy priorytet. Niedotrzymanie ustalonych czasów synchronizacji wiąże się z zatrzymaniem programu robota i zerwaniem połączenia. W celu zabezpieczenia się przed zerwaniem komunikacji z robotem zastosowano dodatkowy pomocniczy wątek, obsługujący tylko bibliotekę *FRI*. Wszystkie metody wykorzystywane przez ten wątek zostały umieszczone w klasie *FRIHandler*. Implementacja obsługi komunikacji z robotem została umieszczona w metodzie *FRIHandler::update()*. Każda iteracja pętli *update()* wymusza aktualizację poszczególnych parametrów, jeśli od czasu ostatniej iteracji zostały one zmodyfikowane przez inny wątek. W celu zapewnienia komunikacji z konsolą haptyczną stworzono osobny wątek obsługujący bibliotekę *FD SDK*. Podobnie jak w przypadku wątku *FRI*, implementacja obsługi interfejsu urządzenia została umieszczona w jednej pętli aktualizującej poszczególne parametry w każdej iteracji. Wątek pomocniczy *control thread* działa niezależnie od pozostałych części aplikacji i wykorzystuje klasę główną *telemanipulation_system*. Wątek ten wykonuje następujące zadania:



Rysunek 13. Wpływ zmiany admitancji na pozycjonowanie narzędzia (gdzie c – współczynnik tłumienia, zgodny z równaniem (1))

Figure 13. Impact of admittance change on tool positioning (where: c – damping factor according to equation (1))

- odczytuje aktualne siły działające na narzędzie robot,
- odczytuje aktualną pozycję i orientację narzędzia robota,
- odczytuje aktualną pozycję oraz siły działające na efektor konsoli haptycznej,
- sprawdza czy przycisk zezwolenia jest wciśnięty (wciśnięcie przycisku umożliwia poruszanie narzędzia robota za pomocą ruchu efektora konsoli),
- odczytuje i przekazuje do wątków pomocniczych nowe wartości sił i pozycji robota oraz konsoli haptycznej,
- sprawdza czy przyciski zmiany parametrów są wciśnięte,
- zapisuje aktualne dane do pliku tekstowego w celu ewentualnego późniejszego przetwarzania,
- ustawia flagę synchronizującą heartbeat dla wątków pomocniczych.

W zależności od wybranego trybu możliwe jest sterowanie robotem w trybie admitancyjnym lub impedancyjnym. W obu trybach sterowania zdecydowano się na przeniesienie sił zmierzonych przez układy pomiarowe robota na konsolę haptyczną jako sprzężenie zwrotne dla operatora.

BADANIA EKSPERYMENTALNE

W ramach prowadzonych badań przeprowadzono szereg testów działania algorytmów sterowania. Dokładny opis testów przedstawiono w pracy [14]. Podczas realizacji badań zauważono, że zmiana wartości współczynników sprężystości oraz tłumienia robota przekłada się na zmianę dokładności pozycjonowania narzędzia podczas pracy w trybie admitancyjnym. W trakcie sterowania admitancyjnego wywierana jest odpowiednia siła przesuwa- jąca narzędzie manipulatora do pozycji zadanej. W przypadku napierania siłą na narzędzie charaktery- zujące się dużą podatnością, część energii jest roz-

praszana na elementach sprężystych jak i tłumią- cych. Nierozproszona część energii zgromadzona w elementach sprężystych jest oddawana z opóź- nieniem. W przypadku zastosowania stałego wy- muszenia, zmniejszenie admitancji jest widoczne poprzez opadanie narzędzia w polu grawitacyjnym. W celu uwydatnienia efektu opadania, nieruchome narzędzie zostało ręcznie i jednorazowo wprowadzone w drgania, pozwalające przezwyciężyć tarcie statycz- ne w złączach manipulatora. Efekt przedstawiono na rysunku 13.

Porównując początkową i końcową pozycję narzę- dzia skierowanego pionowo w dół, można zauważyć, że w przypadku stosowania małej wartości współ- czynnika tłumienia c narzędzie znacząco opada.

PODSUMOWANIE

W przedstawionej pracy, poprawnie zrealizowano aplikację pozwalającą na sterowanie robotem za pomocą konsoli haptycznej. Zaimplementowany wielowątkowy program odpowiada za przetwarza- nie sygnałów i sterowanie ruchem obu urządzeń. Aplikacja zapewnia prosty w formie konsoli, inter- fejs użytkownika umożliwiający zmianę podstawo- wych parametrów działania systemu. Zastosowanie sterowania admitancyjnego zostało uznane za bar- dzo korzystne rozwiązanie w przypadku konieczno- ści przemieszczania narzędzia z dużą dokładnością. Dzięki wzbudzeniu pętli głównej programu co 1 ms uzyskano bardzo wysoką jakość nadążania robota za zadajnikiem haptycznym. W przypadku pozycjo- nowania i przemieszczania narzędzia, opóźnienie pętli komunikacyjnej jest niemal nie zauważalne. Nieste- ty ze względu na pomiar sił tylko w złączu i przeli- czaniu ich wartości na siły działające na końcówkę narzędzia, zaimplementowane sprzężenie haptycz- ne charakteryzuje się słabą jakością odwzorowaniem kontaktu narzędzia ze środowiskiem. W przypadku szybkich, impulsowych ruchów system nie pozwala na poprawne oszacowanie miejsca styku narzędzia

ze środowiskiem. Znacznie lepsze efekty można zaobserwować, jeśli narzędzie prowadzone jest powoli i płynnie. Z drugiej strony zaimplementowane sterowanie impedancyjne pozwala na efektywne kontrolowanie siły nacisku narzędzia na środowisko. Dzięki zastosowaniu odpowiedniego ułożenia konsoli haptycznej oraz odwzorowaniu sił działających na narzędzie robota w trybie sterowania impedancyjnego możliwe jest prowadzenie narzędzia w dowolnym kierunku ze stałą siłą. Ze względu na właściwości algorytmu nie jest możliwe dokładne pozycjonowanie narzędzia bez dodatkowej zewnętrznej pętli sprzężenia zwrotnego. Dodatkowe funkcje skalowania i zmiany admitancji oraz impedancji robota pozwalają na dokładne dopasowanie właściwości systemu do wybranego zadania.

LITERATURA

- [1] Schlöndorff G., Mösges R., Meyer-Ebrecht D., Krybus W., Adams L., CAS (Computer Assisted Surgery), HNO, 37, s. 187-190, 1989.
- [2] Reinhardt H., Meyer H., Amrein E., A computer assisted device for the intraoperative CT-controlled localization of brain tumours, EurSurgRes, 20, s. 51-58.
- [3] Piątkowski K., Sauer P., Zastosowanie metod chirurgii wspomaganą komputerowo (CAS) w otolaryngologii – chirurgii głowy i szyi, Otolaryngologia Polska, tom LVIII, 5, s. 1027-1033, 2004.

- [4] Sauer A., Aspekty naukowe, techniczne i ekonomiczne zastosowania robotyki w medycynie, praca dyplomowa magisterska, Politechnika Poznańska, 2007.
- [5] Waliszewski W., Telesurgery and Robotics on Tomorrow's Surgery, Materiały konferencyjne The Second International Workshop on Robot Motion and Control, RoMoCo'01, Bukowy Dworek, s. 151-152, 2001.
- [6] Sauer P., Kozłowski K., Waliszewski W., Michalski M., Kielczewski M., Pazderski D., Jeziorek P., ASYSTENT – Control System Assisting Surgeon in Laparoscopy, Biocybernetics and Biomedical Engineering, Vol. 6, No. 4, s. 55-70, 2006.
- [7] K. Krocze. Rynek robotów medycznych, Medical Robotics Reports 2015 4:61-64.
- [8] Force Dimension, Omega.7 Haptic Device Force Feedback Interface (www.forcedimension.com)
- [9] Force Dimension, User Manual Omega.x Haptic Device Version 1.6 (www.forcedimension.com)
- [10] Ł. Mucha, Interfejs użytkownika robota – przegląd urządzeń zadawania ruchu systemów sterowania telemanipulatorów, Medical Robotics Reports vol. 4, 2015, s.39-48 (ISSN 2299-7407).
- [11] G. Schreiber, A. Stemmer, R. Bischoff, The Fast Research Interface for the KUKA Lightweight Robot, Materiały ICRA 2010 Workshop on Innovative Robot Control Architectures for Demanding (Research) Applications, p.15 – 21, 2010.
- [12] Albu-Schäffer A. i inni, The DLR Lightweight Robot – Design and Control Concepts for Robots in Human Environments, Industrial Robot – an International Journal, 34 (5), pp. 376-385. 2007.
- [13] KUKA.FastResearchInterface 1.0 For KUKA System Software 5.6 Ir, KUKA Roboter GmbH.
- [14] T. Krzykowski, System sterowania manipulatorem w zastosowaniach medycznych, praca dyplomowa magisterska, Politechnika Poznańska, 2018.
- [15] N. Hogan, Impedance Control: An Approach to Manipulation: Part I – Theory, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol. 107, 1985, s. 1-7.
- [16] A. Peer, Design and Control of Admittance – Type Telemanipulation System.

KOMENTARZ RECENZENTA...

Krzysztof Mianowski, dr inż., Politechnika Warszawska

W artykule autorzy poruszają bardzo istotny i aktualny problem dotyczący prowadzenia nowoczesnych operacji małoinwazyjnych z użyciem robotów chirurgicznych związany z „manualnym odczuwaniem przez operatora na dłoniach/palcach/skórce fizycznych właściwości obiektu poprzez telemanipulacyjny system robotyczny”. Praca ma charakter doświadczałny, badania doświadczałne przeprowadzono z wykorzystaniem rzeczywistego robota komercyjnego przystosowanego do prowadzenia operacji chirurgicznych współpracującego z typowymi zadajnikami typu haptic device, które pozwalają na odtworzenie na uchwytach zadajników trzymanyh w dłoniach operatora przeskalowanych dynamicznych interakcji siłowych z obszaru styku narzędzie wykonawcze – tkanka operowana.

Paweł Kostka, dr hab. inż. Prof PŚI

Praca dotyczy nowatorskiej koncepcji sterowania admitancyjnego i impedancyjnego, zamodelowanego w kilku wariantach i zaimplementowanego na poziomie instalacji laboratoryjnej do testów, w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. Przedstawione na rys. 13 wyniki eksperymentu nadążania za zadaną pozycją, w testach przy zmieniającej się admitancji obiektu, świadczą o poprawnej koncepcji, implementacji i doborze parametrów układu regulacji, zarówno w warstwie sprzętowej jak i programowej algorytmu.

Robotyka chirurgiczna i nowe technologie w czasach pandemii w Szpitalu na Klinach

Joanna Szyman Prezes Zarządu Neo Hospital

Pandemia, choć groźna w swoich skutkach dla większości obszarów życia i gospodarki, to ma też cechy wyzwalające, chociażby dla medycyny i rozwoju robotyki chirurgicznej. Już przed wybuchem pandemii koronawirusa robotyka chirurgiczna była jedną z najszybciej rozwijających się dziedzin medycyny na świecie. Zapotrzebowanie na małoinwazyjne operacje z wykorzystaniem robotów rosło, zarówno w krajach rozwiniętych, jak i tych rozwijających się. Coraz więcej osób na całym świecie cierpi na chroniczne schorzenia, co przyczynia się do wzrostu liczby przeprowadzanych planowych operacji. Co więcej, wielu pacjentów wybiera bardzo precyzyjne procedury z wykorzystaniem robotów, chcąc zminimalizować ryzyko powikłań pooperacyjnych i skrócić okres rekonwalescencji. I, co ważne, w trakcie epidemii i konieczności izolacji, wiele z tych operacji może być wykonanych na odległość. Pytanie zatem, jak trend tak skokowego rozwoju robotyki i rosnącej roli operacji robotycznych utrzyma się również po wygaśnięciu epidemii.

POLSKI I ŚWIATOWY RYNEK ROBOTYKI CHIRURGICZNEJ

Pandemia i zagrożenia związane z COVID-19 pokazują nam kolejne zalety robotyki chirurgicznej takie, jak możliwość zachowania dystansu, czy w przyszłości możliwość wykonania zabiegu na odległość. Nie sposób pominąć zmian w kwestii kształcenia lekarzy w oparciu o wirtualne treningi na symulatorach pod kontrolą komputera. Wartości, jakie zyskuje pacjent z operacji robotycznej są nie do przecenienia. Mniejsze nacięcia i mniejsza utrata krwi w trakcie operacji oraz większy komfort i krótszy pobyt w szpitalu, a tym samym szybszy powrót do sprawności życiowej i zawodowej, to tylko promień powodów rosnącej popularności chirurgii robotycznej.

Dlatego już przed pandemią producenci robotów chirurgicznych świętowali sukcesy. Według szacunków firmy konsultingowej Global Market Insights, w ciągu najbliższych 6 lat wartość rynku chirurgii robotycznej będzie rosła w tempie niemal 25% rocznie – z 5,5 mld USD w 2018 r. do ponad 24 mld USD w 2025 r. W ponad 40% wartość ta jest generowana na rynku amerykańskim, niemniej jednak rynek europejski wykazuje większą dynamikę, między innymi dzięki otwierającym się na systemy robotyczne kolejnym krajom. Warto tutaj podkreślić,

że zeszłoroczny raport „Rynek robotyki chirurgicznej w Polsce 2019. Prognozy rozwoju na lata 2020-2023”, przygotowany przez zespół ekspertów ds. analiz i badań rynkowych z firmy PMR we współpracy z Upper Finance przewiduje, że w Polsce rynek ten może urosnąć w ciągu najbliższych czterech lat z 92 mln zł w 2019 r. do nawet 500 mln zł w 2023 r., czyli ponad 50% średniorocznie.

Wyłączny dystrybutor systemów robotycznych da Vinci w Polsce, firma Synektik odnotowała w Polsce aż 51-proc. dynamikę wzrostu liczby wykonanych procedur. Wzrost ten mógłby być znacznie wyższy, gdyby nie pandemia, która wpłynęła na dynamikę pracy niektórych ośrodków.

W Polsce mamy obecnie 10 systemów da Vinci i spore szanse, że jeszcze w tym roku przybędą kolejne systemy. Na świecie funkcjonuje aktualnie ponad 5,5 tys. robotów da Vinci, a co 26 sekund odbywa się operacja z wykorzystaniem tego systemu. Dotychczas na całym świecie przeprowadzono ponad 7,2 mln operacji z udziałem systemu da Vinci.

Nie bez znaczenia jest również fakt, że potencjał w nowych technologiach dostrzega również Komisja Europejska, która zaprezentowała wizję transformacji cyfrowej kontynentu. To inicjatywy dotyczące wdrożenia sztucznej inteligencji i rozwiązań

robotycznych w różnych obszarach, w tym również w obszarze medycznym – obecnie mające pomóc w rozwiązywaniu trwającego kryzysu COVID-19, ale docelowo mające znaczenie dla całej branży medycznej.



– Konsekwencją epidemii koronawirusa, a tym samym czynnikiem rozwoju, będzie skok technologiczny, który wykona medycyna. Nie bez znaczenia jest tu również rola zarządzających podmiotami medycznymi, którzy podejmą właściwe decyzje o implementacji takich rozwiązań i ich umiejętnym wdrożeniu. W dobie szerzącej się pandemii, ograniczonych zasobów, jasne staje się, że chirurgia klasyczna będzie tak, jak na całym świecie, tak również i w Polsce, ustępować miejsca chirurgii wspieranej robotycznie, a na blokach operacyjnych i w opiece nad pacjentami coraz większą rolę odgrywać będą systemy robotyczne. To bardzo dobry i ważny krok, nie tylko dla medycyny w ogóle, ale w szczególności dla pacjentów – mówi Joanna Szyman, prezes zarządu Szpitala na Klinach, Grupy NEO Hospital.

ZABIEGI ROBOTYCZNE W CZASIE PANDEMII W SZPITALU NA KLINACH – GRUPA NEO HOSPITAL

Z powodu epidemii koronawirusa pacjentów dotknęły duże ograniczenia w funkcjonowaniu placówek ochrony zdrowia.

– Nasz szpital w całym okresie pandemii utrzymywał ciągłość pracy. Dodatkowo na stałe wykorzystujemy rozwiązania telemedyczne i konsultacje online. Od początku pandemii przyjęliśmy w naszym szpitalu ponad 2,5 tys. pacjentów, a wśród nich znaczną grupę stanowili pacjenci onkologiczni. Wielu z nich dzięki rozwiązaniom telemedycznym mogło być wstępnie zakwalifikowanych do zabiegu. Właśnie pandemia uświadamia nam, jak wielkie znaczenie dla przetrwania takich kataklizmów mają szpitale, kadra medyczna, a także nowoczesne technologie, w tym robotyka chirurgiczna – dodaje Joanna Szyman.

Na tym nie koniec. W Szpitalu na Klinach jest możliwość zastosowania systemu CarnaLife Holo. To zaawansowany system, stworzony przez polską firmę technologiczną MedApp, który pozwala tworzyć,

bazując na medycznych danych obrazowych, holograf odzwierciedlający prawdziwą strukturę obszaru anatomicznego. By lepiej przygotować lekarza do operacji wykorzystuje tzw. rzeczywistość mieszaną. Na podstawie tomografii komputerowej (CT), rezonansu magnetycznego (MRI), USG, czy też innych modalności dostępnych w standardzie obrazowania DICOM, tworzy się wirtualny, trójwymiarowy obraz pacjenta.



– Szpital na Klinach codziennie działa przy wsparciu nowoczesnych technologii – dając nadzieję i ratując życie naszym pacjentom. Do naszej placówki zgłaszają się pacjenci wymagający niezwłocznej pomocy chirurgicznej, również pacjenci, których choroby współistniejące, w tym otyłość olbrzymia, cukrzyca, nadciśnienie, dyskwalifikowały do wykonania zabiegów małoinwazyjnych. W takim przypadku często rozwiązaniem jest operacja wykonana przy wsparciu robota da Vinci. Jako istotne zagrożenie dla pacjentów widzimy wstrzymywanie leczenia, badań profilaktycznych i diagnostyki, a przede wszystkim zabiegów. Dlatego zwracamy się do pacjentów aby nie przerywali leczenia, nie rezygnowali z wizyt kontrolnych, czy badań a także konsultacji z lekarzami – mówi Józefa Job, Dyrektor Medyczna Szpitala na Klinach.

Zaniechania leczenia może zebrać fatalne żniwo w postaci przedwczesnych zgonów, czy też ciężki powikłań. Zwleknięcie z przyjściem do szpitala może pogorszyć szanse na powodzenie procesu terapeutycznego.

ROBOTYKA CHIRURGICZNA – POTENCJAŁ, KTÓRY POLSKA MOŻE WYKORZYSTAĆ

Popyt na usługi z wykorzystaniem robotów chirurgicznych jest obecnie tak duży, że możliwości Intuitive Surgical w obszarze kształcenia i dostępu do ośrodków kształcących zaczynają się zapychać. Amerykańskie i europejskie centra szkoleń miały dwu-, a czasami nawet trzymiesięczne kolejki chętnych do odbycia kursów podstawowych jeszcze przed wybuchem pandemii. Obecnie koronawirus wydłużył je o kolejnych kilka miesięcy.

Paradoksalnie właśnie ta sytuacja stanowi ogromną szansę dla polskich, młodych, wschodzących ośrodków rozwoju robotyki chirurgicznej.



– To dla nas niepowtarzalna szansa aby dołączyć do liderów w Europie i stać się jednym z kluczowych ośrodków kształcenia kadr robotycznych na świecie – podkreśla dr Paweł Wisz, urolog z krakowskiego Szpitala na Klinach, członek zarządu Europejskiego Robotycznego Towarzystwa Urologicznego. – Już dzisiaj, jako krakowski ośrodek, jesteśmy prywatnym centrum specjalizującym się w małoinwazyjnej, robotycznej chirurgii w zakresie ginekologii, chirurgii – ogólnej, kolorektalnej, bariatrycznej, a przede wszystkim w mojej specjalizacji – urologii. Znani jesteśmy z zastosowania innowacyjnych sposobów wykonywania radykalnej prostatektomii robotycznej, np. metodą Collar, która maksymalizuje u mężczyzn szansę na zachowanie funkcji trzymania moczu, przy zachowanym bezpiecznym wyniku onkologicznym.

Nowoczesne technologie są coraz bardziej zintegrowane z medycyną, dlatego też tak ważne jest jak najszybsze dostosowanie i uruchomienie odpowiednio dużej liczby profesjonalnych szkoleń medycznych i chirurgicznych dla przyszłych lekarzy.

– Wyzwanie, przed którym stoimy, polega na tym, że technologia ewoluuje w niezwykle szybkim tempie, a my w medycynie musimy być gotowi ją utrzymać, zarządzać i dzielić się nią, a przede wszystkim stosować ją w bezpieczny sposób aby móc rzeczywiście pomagać naszym pacjentom. Doświadczenie w chirurgii otwartej, czy laparoskopowej, z którym pojawia się większość naszych kursantów, z pewnością nie jest wystarczające do operowania robotem chirurgicznym, takim jak system da Vinci. Bowiem praca na systemie robotycznym wymaga dodatkowego przeszkolenia, głównie w obszarze zachowania się maszyny w różnych warunkach, radzenia sobie z potencjalnymi komplikacjami, które mogą się pojawić podczas zabiegu, jak i nauczania się zupełnie nowej techniki operacyjnej. Symulacja chirurgiczna, którą już udostępniamy naszym kursantom dzięki symulatorowi SimNow, z pewnością zyskuje

dziś na znaczeniu i popularności, ponieważ nie tylko pozwala chirurgom na wykonywanie operacji w rzeczywistości wirtualnej ale również pozwala minimalizować ryzyko powikłań podczas właściwej operacji – dodaje dr Paweł Wisz.

Według ekspertów dzisiaj, jako branża medyczna w Polsce, jedynie dotknęliśmy wierzchołka góry lodowej, jakim jest otwarty dostęp do szkoleń robotycznych.

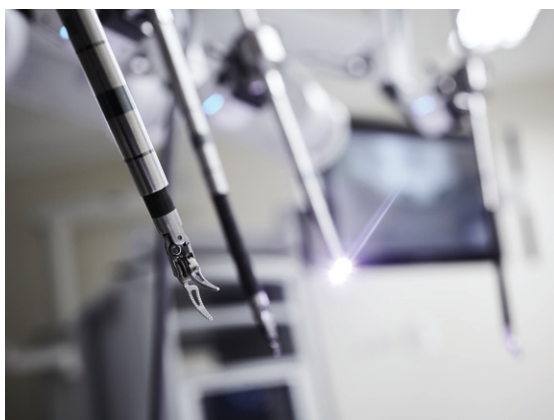


– Jestem przekonany, że już niedługo nasi kursanci będą mogli oglądać procedury w technologii 3D i szkolić się od mistrzów we własnych domach. Trzeba również pamiętać o fakcie, że im więcej wykształconych chirurgów w technikach robotycznych takich, jak da Vinci, tym więcej pacjentów będzie mogło być beneficjentami tych minimalnie inwazyjnych zabiegów. Dla przykładu w USA użycie robota da Vinci zastąpiło technikę chirurgii otwartej u 99% pacjentów urologicznych. Powód? Operacje wykonywane w ten sposób są nie tylko bardziej precyzyjne dla lekarza, który je wykonuje, ale przede wszystkim niosą ze sobą szereg korzyści dla pacjentów, jak niewielki ból pooperacyjny, mniejsze dawki leków przeciwbólowych, niższy odsetek powikłań, krótszy czas cewnikowania i rekonwalescencji, czy możliwość otrzymania satysfakcjonujących efektów w zakresie trzymania moczu oraz funkcji seksualnych – podsumowuje urolog.

ROLA LEKARZY A ROBOTY PRZYSZŁOŚCI

W kontekście dynamicznie rozwijającej się robotyzacji chirurgii, nie unikniemy dyskusji o sztucznej inteligencji. W perspektywie jednego pokolenia, lekarze będą używać technologii opartych na sztucznej inteligencji i analizie dużych baz danych, jako urządzenia pomocniczego, gdzie lekarz będzie otrzymywał podpowiedzi systemu. Jednak w dalszym ciągu to wyłącznie lekarz będzie samodzielnie decydował o wyborze metody leczenia.

– Jestem przekonany, że obecna intensywna robotyzacja chirurgii prowadzi nas w kierunku autonomicznych systemów. Już dzisiaj gromadzone są bazy danych ruchów ramion robotów chirurgicznych,



a tym samym kreowane są systemy, które już teraz mogą samodzielnie wykonywać określone czynności. Natomiast ze względów prawnych w dalszym ciągu w medycynie samodzielna praca robotów nie jest jeszcze rzeczywistością. Znane są też polskie firmy budujące roboty, które uczestniczą w projektach budowy autonomicznych systemów medycznych, z czego jestem niezmiernie dumny, że mogę z nimi współpracować naukowo i wspierać ich swoją wiedzą oraz doświadczeniem. A że rynek nie lubi próżni, a prawo prędzej czy później będzie musiało usankcjonować prawnie sztuczną inteligencję w medycynie, to autonomiczne systemy możemy traktować jako kolejny krok, po robotyzacji medycyny – mówi prof. dr hab. n. med. Wojciech K. Karcz.

To, jak rozwinie się globalna struktura społeczna, a w tym medycyna po roku 2050, jest dużą niewiadomą. Większość z nas uważa, że sztuczna inteligencja rozwinie się do poziomu intelektu ludzkiego. Dlatego to najwyższy czas, aby stworzyć ramy prawne, aby uniemożliwić nieetyczne wykorzystywanie technologii, w tym również w medycynie. Taką inicjatywę podjęła już jedna z organizacji technologicznych – International Society for Minimally Invasive Therapy – proponując Deklarację Seulską w roku 2018 („The Seoul Declaration: A Manifesto for Ethical Medical Technology”).

The COVID-19 pandemic has negatively affected many areas of everyday life and business but it may well prove to be a game changer for many sectors of our economies, including medicine and innovative medical technologies. Even prior to the pandemic, robotic surgery was one of the fastest growing areas of medicine worldwide, due to the growing demand for less invasive and more precise robotic procedures that reduce pain, minimise the loss of blood and the risk of infection, leave less scarring, shorten the recovery and, in many cases, produce better clinical outcomes. However, as ever stricter lockdown and isolation measures were being imposed all around the world, we could observe cancellations and re-scheduling of planned procedures leading to longer waiting times in large centres but also a growing interest in new medical technologies enabling not only online consultations to maintain social distancing but also, potentially, remote surgeries. In the post-COVID world, the trend towards using robotic surgery and other advanced medical technologies, such as Augmented Reality (AR), is likely to gather pace as digital technology transformation is seen as a way out of the crisis by the European Commission, and the role of medicine in times of public health threats becomes more valued.

At the Cracow-based “Szpital na Klinach” managed by NEO Hospital Group, priding itself on being one of the most technologically advanced hospitals in Poland, online consultations for oncology patients as well as pre-qualification procedures for robotic surgeries were offered throughout the lockdown without any disruption. It was important for patients needing emergency consultation and treatment but also those planning to undergo robotic procedures as they could not use traditional less-invasive ones due to underlying health conditions, such as obesity, diabetes or hypertension. As one of very few centres in CEE offering surgeries using Intuitive Surgical’s world-leading da Vinci Surgical System, it continues to expand the offer of its Robotic Surgery Centre by implementing AR systems such as CarnaLife Holo developed by the Polish technology firm MedApp. It also has its own centre for training surgeons in robotic systems using the SimNow surgery simulators, with a potential of developing distant learning courses. With waiting times in leading centres growing longer due to the pandemic, it offers an alternative to both patients wishing to take advantage of robotic surgery without waiting and to future practitioners of robotic surgery looking for training options.

Zastosowanie egzoskieletów w rehabilitacji ruchowej u pacjentów ze stwardnieniem rozsianym

Application of exoskeletons in motor rehabilitation in patients with multiple sclerosis

Artykuł recenzowany

Streszczenie

Stwardnienie rozsiane (SM) jest schorzeniem neurologicznym prowadzącym często do inwalidztwa, dlatego w jego leczeniu dużą rolę odgrywa rehabilitacja. Zarówno neurologzy jak i fizjoterapeuci szukają najlepszych metod, by poprawić stan neurologiczny chorych na SM. Naprzeciw tym potrzebom wychodzą nowoczesne technologie, oferując innowacyjne rozwiązanie – egzoskielety. W artykule przedstawiono przegląd wybranych egzoskieletów stosowanych w neurorehabilitacji wraz z najnowszymi doniesieniami naukowymi o efektach przeprowadzanej z ich użyciem terapii u pacjentów z diagnozą stwardnienia rozsianego.

Abstract

Multiple sclerosis (MS) is a neurological disease that often leads to disability, therefore rehabilitation plays a significant role in its treatment. Both neurologists and physical therapists are searching for the best methods to improve the neurological condition of people with MS. Modern technologies meet these needs, offering an innovative solution – exoskeletons. The article presents an overview of selected exoskeletons used in neurorehabilitation together with the latest scientific reports on the effects of therapy performed using exoskeletons in patients diagnosed with multiple sclerosis.

DOMINIKA ADAMCZYK¹
JACEK JANKOWSKI¹

¹ Śląski Uniwersytet Medyczny
w Katowicach

Słowa kluczowe:

rehabilitacja,
stwardnienie rozsiane,
egzoskielety

Keywords:

rehabilitation,
multiple sclerosis,
exoskeletons

WPROWADZENIE

Stwardnienie rozsiane (SM) jest przewlekłą, nieuleczalną, autoagresywną chorobą demielinizacyjną, na którą zapadają głównie młodzi dorośli. Charakteryzuje się powstawaniem ubytków w strukturze osłonek mielinowych komórek nerwowych ośro-

kowego układu nerwowego wskutek autoimmunologicznej reakcji zapalnej, przez co w wielu przypadkach nieuchronnie prowadzi do pogorszenia jakości życia, niepełnosprawności ruchowej i finalnie do zgonu. Dlatego też w celu spowolnienia przebiegu choroby, złagodzenia objawów, a także odzyskania

przynajmniej częściowo sprawności, obok przewlekłego leczenia preparatami leczniczymi modyfikującymi odpowiedź układu odpornościowego, bardzo ważną rolę powinna pełnić rehabilitacja. Jedną z najnowocześniejszych metod używanych w rehabilitacji zaburzeń ruchowych u pacjentów chorych na stwardnienie rozsiane jest trening z użyciem egzoszkieletu. Obecnie sprzęt ten nie jest jeszcze w Polsce powszechnie używany, m. in. ze względu na wysoką cenę, a także fakt, że efekty treningów przy użyciu egzoszkieletu są wciąż poddawane badaniom klinicznym. Rezultaty badań są obiecujące, co zostanie opisane w dalszych częściach artykułu.

WYBRANE PRZYKŁADY EGZOSZKIELETÓW MEDYCZNYCH

Egzoskielet to przenośne, mocowane na zewnątrz ciała pacjenta urządzenie zasilane silnikami bądź siłownikami elektrycznymi, które całkowicie bądź tylko częściowo wspomaga ruch kończyn pacjenta, w zależności od pożądanego ustawienia, które można modyfikować za pomocą kontrolującego egzoszkielet komputera. Struktura pozwala na wykonywanie chodu oraz innych czynności pacjentom po przebytym udarze, urazie (a nawet przerwaniu) rdzenia kręgowego, cierpiącym na zaburzenia ruchowe z powodu stwardnienia rozsianego oraz innych chorób neurodegeneracyjnych. Istnieją egzoszkielety do rehabilitacji zarówno kończyn dolnych jak i kończyn górnych, natomiast zdecydowanie popularniejsze są te wspomagające funkcję chodu [1].

- **ReWalk** – to stworzona przez izraelską firmę ReWalk Robotics specyficznie i indywidualnie dopasowana do pacjenta bioniczna orteza zasilana baterią. Napędzana jest czterema silniczkami elektrycznymi znajdującymi się na poziomie stawów biodrowych oraz kolanowych, które kontrolowane są przez komputer. Pacjent inicjuje pierwszy krok wychylając górną część ciała do przodu, następnie kontroluje ruch przy pomocy subtelnych zmian w obrębie swojego środka ciężkości. Powtarzalna sekwencja wyżej wymienionych ruchów składa się na imitację naturalnego chodu. W 2017 roku zespół Allana J. Kozłowskiego przeprowadził pracę badawczą na grupie 14 pacjentów z SM. Ocenie poddano m.in. przystępność urządzenia do użytku przez badanych chorych, tolerancję treningu oraz łatwość uczenia się obsługi sprzętu. Przystępność, czyli możliwość uczestnictwa chorych w badaniu, która limitowana była warunkami anatomicznymi – wyniosła 86%, tolerancja 55% (część chorych zrezygnowała z powodu braku możliwości dojazdu lub bólu towarzyszącego terapii), natomiast nauka obsługi we wszystkich przypadkach wymagała zaledwie jednej sesji tre-



Rysunek 1. Egzoskielet ReWalk – źródło: <https://rewalk.com/>

ningowej. W związku z powyższym ostatecznie do badania zakwalifikowano jedynie pięć osób. Badanie wykazało, że po co najmniej 20 sesjach treningowych z użyciem egzoszkieletu ReWalk u czterech z pięciu badanych pacjentów z SM poprawie uległa zdolność utrzymania prawidłowej postawy ciała, a u jednego z nich zanotowano zauważalne usprawnienie przemieszczania się. Pracę badawczą przeprowadzono na bardzo małej grupie chorych, dlatego wymagane są badania na większą skalę, żeby uznać wyniki za znamienne statystycznie [2].

- **Ekso GT/NR** – to egzoskielet amerykańskiej firmy Ekso Bionics. Konstrukcja i zasada działania podobne są jak w produkcie firmy ReWalk Robotics, jednak egzoskielet ten dedykowany jest ściśle neurorehabilitacji. Jest to jeden z kilku dostępnych modeli egzoszkieletów w Polsce (pozostałe to np. ReWalk, HAL, Indego, FreeWalk) [3]. Wiodącym dystrybutorem na terenie Polski jest firma PHU Technomex Sp. z o. o. Wyniki badania Taimoor Afzal i wsp. opublikowanego w 2019 są następujące: 3-tygodniowy trening z egzoszkieletem Ekso GT/NR u dziewięciu na dziesięciu badanych pacjentów z SM zwiększył płynność i średnią prędkość chodu, co wynikało z mniejszego wydatku energetycznego, którego zmniejszenie korelowało z lepszą koordynacją nerwowo-ruchową [4]. Z najnowszych doniesień naukowych wynika, że egzoskielet GT/NR jest



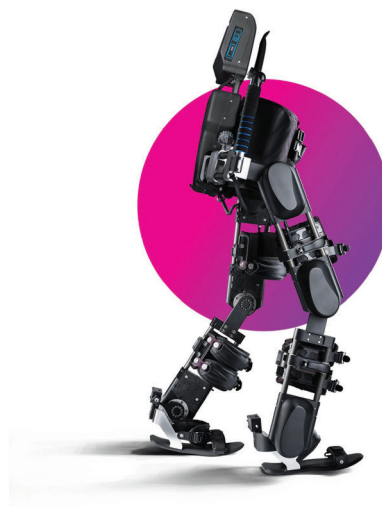
Rysunek 2. Egzoszkielet GT/NR – źródło: <https://eksobionics.com>

obecnie poddawany kilku podobnym projektom badawczym bądź niedawno te prace zakończono, lecz nie opublikowano jeszcze wyników badań m. in. przez Francois Bethoux z Cleveland Clinic w USA [5], przez Rakeł Berriozabalgaitia i wsp. (ADEMBI, Multiple Sclerosis Association of Bizkaia, Bilbao, Hiszpania i in.) – jest to jedno z większych badań z grupą aż 36 chorych, w którym oprócz efektów ruchowych ocenie poddana będzie ewentualna poprawa zdolności poznawczych i jakości życia w subiektywnym odczuciu pacjenta[6]. Nie opublikowano jeszcze także rezultatów projektu badawczego przeprowadzonego w Polsce w Krajowym Ośrodku Mieszkalno- Rehabilitacyjnym dla Osób Chorych na SM w Dąbku we współpracy z polskim dystrybutorem Ekso GT – firmą PHU Technomex Sp. z o. o.

- **Keeogo** – produkt kanadyjskiej firmy B-Temia Inc. to egzoszkielet ubierany na kończynę bądź kończyny dolne przeznaczony dla pacjentów ze stwardnieniem rozsianym lub zaburzeniami neurologicznymi i mięśniowo-szkieletowymi na podłożu innych chorób. Głównym przeznaczeniem urządzenia jest wsparcie pacjenta w czynnościach dnia codziennego tak, by mógł funkcjo-



Rysunek 3. Egzoszkielet Keeogo – źródło: <https://keeogo.com>, <https://b-temia.com/>



Rysunek 4. Egzoszkielet ExoAtlet i Bambini – źródło: <https://exoatlet.lu/>

nować samodzielnie w domu i nie był wyłączony z życia społecznego. W amerykańsko-kanadyjskim badaniu opublikowanym w 2018 roku Chris A McGibbon i wsp. opisali, że 2-tygodniowy trening w domu z egzoszkieletem Keeego poprawił w grupie pacjentów z SM wydajność chodu i zdolność wchodzenia po schodach bez asysty urządzenia [7]. W odróżnieniu od produktów Ekso i ReWalk urządzenie może być używane tylko przez osoby, które chodzą samodzielnie, a jedynie potrzebują korekty ubytków ruchowych utrudniających poruszanie się.

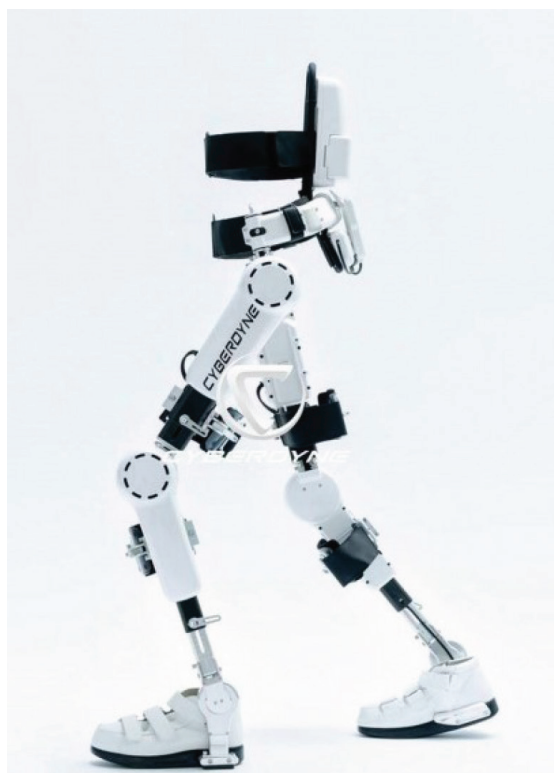
- **ExoAtlet** – egzoszkielec stworzony przez rosyjską firmę o tej samej nazwie. Zaopatrzony został w kilka nowoczesnych udogodnień zarówno dla pacjenta, jak i dla fizjoterapeuty prowadzącego rehabilitację: jednostka kontrolująca spastyczność kończyn, ergonomiczne uchwyty na plecach, zdalna kontrola urządzenia przez samego ćwiczącego przy pomocy przycisków na kulach, jak i z użyciem tabletu przez asystenta oraz wskazówki głosowe korygujące chorego. Ten egzoszkielec przystosowany jest do pokonywania nierównych powierzchni i może być użytkowany na schodach. S. V. Kotov i wsp. (Vladimirsky Moscow Regional Research Clinical Institute w Moskwie) w swojej pracy badawczej z 2017 roku donoszą, że po ukończeniu cyklu rehabilitacji z egzoszkieletem u badanych chorych z diagnozą SM poprawie uległy prędkość i stabilność chodu i zanotowano mniej nasiloną spastyczność. U dziewięciu z osiemnastu badanych uległa nawet zmianie na mniejszą kategoria w rozszerzonej skali niewydolności ruchowej Kurtzkiego (EDSS) [8]. Po trzech latach w tym samym instytucie w Moskwie przeprowadzono nowy projekt badawczy na większą skalę (44 badanych) również z użyciem ExoAtlet, tym razem oprócz parametrów z poprzedniego badania oceniając także wpływ rehabilitacji ruchowej na zdolności poznawcze oraz funkcje ruchowe kończyny górnej – zaobserwowano znaczącą poprawę w powyższych kategoriach [9]. Firma ExoAtlet jest jedną z pierwszych firm na świecie, która zaprojektowała egzoszkielec dla dzieci Bambini.
- **Marsi Active Knee (MAK)** to wyprodukowana przez hiszpańską firmę Marsi Bionics pierwsza robotyczna orteza kolana z funkcją elastycznego uruchamiania stawu kolanowego imitującą czynność mięśni poruszających stawem w naturalnych warunkach. Dzięki bogatemu wyposażeniu w sensory analizuje biomechanikę chodu pacjenta i usprawnia ją. Działa w trzech trybach: Zero force control (F0) bez mechanicznej korekty, M1 z częściową korektą jedynie wspierającą i korygującą ruch pacjenta oraz M3 – całkowita



Rysunek 5. Egzozoszkielec Marsi Active Knee (MAK) – źródło: <https://marsibionics.com/>

sztynna korekta nie adaptująca się do ruchów pacjenta. Jest to jeden z lepszych produktów tego typu na rynku – waży zaledwie 2,8 kg. W 2020 roku G. Puyuelo-Quintana i wsp. przeprowadzili badanie z użyciem tego sprzętu na grupie 5 pacjentów (4 po przebytych udarach oraz 1 z diagnozą SM). Badano bezpieczeństwo oraz ewentualne efekty uboczne rehabilitacji. Nie zanotowano żadnych działań niepożądanych terapii. Stwierdzono najlepsze efekty rehabilitacji przy użyciu trybu M3[10].

- **The Hybrid Assistive Limb (HAL)** to elektrycznie zasilany egzozoszkielec opracowany przez japoński uniwersytet Tsukuba i firmę Cyberdyne. Zasada jego działania jest zupełnie inna niż dotychczas opisywanych w artykule egzozoszkielec. Urządzenie oferuje możliwość monitorowania skurczów mięśni za pomocą elektrod EMG umieszczonych na zginaczach i prostownikach kończyn dolnych. To pozwala na wykonywanie ruchów zgodnych z wolą pacjenta, nawet jeśli drogi nerwowe ruchowe i czuciowe są uszkodzone. Impuls z kory ruchowej jest odbierany i wzmacniany przez system HAL, następnie nawet śladowe impulsy nerwowe pochodzące z mięśni są wzmacniane i przewodzone do kory czuciowej mózgu. Przywrócona aktywność neuronalna i powtarzalne wykonywanie specyficznych zadań ruchowych wspomaga proces uczenia się ośrodkowego układu nerwowego odczytywania bodźców proprioceptywnych na nowo, co skutkuje pozytywnym efektem terapeutycznym treningu ruchowego przy pomocy HAL[1,11]. Emre Yilmaz i wsp. w 2019 roku przeprowadzili badanie na



Rysunek 6. Egzoszkielet HAL – źródło: <https://disruptordaily.com/>

grupie pacjentów z deficytami nerwowo-mięśniowymi m.in. u pacjentów z SM. Badano jak składający się z 60 sesji treningu na bieżni z użyciem systemu HAL wpłynie na mobilność i jakość życia pacjentów. Efekty oceniano przy pomocy kwestionariuszy (EQ-5D oraz PROMIS nt. mobilności). Mobilność poprawiła się u pięciu z sześciu badanych, natomiast nie zanotowano znaczącego wpływu na poprawę jakości życia [12].

- **Armeo Spring** – stacjonarna orteza szwajcarskiej firmy Hocoma służąca do neurorehabilitacji kończyny górnej. Dzięki zapewnieniu całkowitej podpory kończynie górnej tak, by zminimalizować obciążenie dla pacjenta wywołane przez sam jej ciężar, Armeo Spring umożliwia chorym wykorzystanie własnych, nawet resztkowych funkcji ruchowych w celu powtarzalnego wykonywania ruchów kończyną górną. W tym celu służą dodatkowo motywujące programy ćwiczeniowe opierające się na rzeczywistości wirtualnej w formie gier wyświetlanych na ekranie komputera, w których pacjent steruje własnym ramieniem, dłonią i palcami. Dość stare badanie (2011) Domiena Gijbelsa i wsp. przeprowadzono na 10 pacjentach ze zdiagnozowanym SM o wysokim stopniu inwalidztwa (7-8,5 w skali EDSS). Rehabilitacja nie wpłynęła na siłę mięśniową, ale badani osiągnęli znaczącą poprawę w testach funkcjonalnych kończyny górnej (m.in. 9-Hole



Rysunek 7. Egzoszkielet Armeo Spring – źródło: <https://hocoma.com/>

Peg Test) [13]. W 2019 roku Ghaith J. Androwis porównali efekty rehabilitacji chodu z użyciem egzoszkieletu z efektami konwencjonalnej terapii (grupa kontrolna) u pacjentów ze stwierdzonym SM. Po 4 tygodniach treningu w grupie pacjentów ćwiczących z egzoszkieletem zwiększeniu uległy: średnia prędkość chodu, długość kroku oraz szybkość stawianiu kroku w warunkach bez wsparcia urządzenia. W grupie kontrolnej natomiast zanotowano jedynie niewielką poprawę jakości chodu[14]. Podobnie jak w wymienionych powyżej projektach badawczych, w badaniach tym wzięła udział niewielka grupa chorych.

■ PODSUMOWANIE

Dane z dostępnego piśmiennictwa dotyczące rehabilitacji z użyciem egzoszkieletów osób z diagnozą SM są w dalszym ciągu zbyt skąpe, żeby z pewnością móc postulować o wyższości tej terapii nad konwencjonalną fizjoterapią. Obserwuje się pozytywny wpływ treningu z egzoszkieletami na wiele funkcji ruchowych zarówno kończyn dolnych jak i górnych, więc na pewno te metody są skuteczne. Dużymi zaletami najnowocześniejszych egzoszkieletów są ich mobilność i możliwość ubierania przez pacjenta, a także komputerowa kontrola zarówno przez fizjoterapeutę, jak i odpowiednio przeszkolonego chorego, co pozwala na pewną niezależność od osób trzecich, która jest tak ważna w procesie terapeutycznym. Niewątpliwą wadą robotycznej fizjoterapii jest bardzo wysoka cena sprzętu i trudna dostępność dla pacjenta. Jedynie akredytowane firmy i ośrodki rehabilitacyjne mają dostęp do tak nowoczesnego, innowacyjnego urządzenia, jakim jest egzoszkielet. Należy z ciekawością śledzić najnowsze plany badań nad ich przydatnością we wspomaganiu terapii chorych na stwardnienie rozsiane – zachorowalność na tę chorobę ewidentnie koreluje z rozwojem naszej cywilizacji [15,16], więc z pewnością będzie to temat wciąż zgłębiany przez wielu naukowców. Równocześnie bardzo szybki rozwój nowoczesnych technologii daje wiele możliwości usprawnienia i udoskonalenia

nia urządzeń fizjoterapeutycznych. Egzoszkielety są symbolem „nowej epoki” w rehabilitacji SM i innych chorób neurologicznych, jednak potrzeba więcej badań na dużych grupach chorych, by możliwe było ustalenie, jaki konkretnie egzoszkielet, jak długo i z jaką częstotliwością stosowany, da najlepsze efekty u pacjentów z określonym stopniem niepełnosprawności i konkretnym przebiegiem choroby, a także jakie modyfikacje i ulepszenia pozwolą na osiągnięcie upragnionego celu terapeutycznego, jakim jest niezależność i możliwość niezakłóconego funkcjonowania chorego w społeczeństwie.

PIŚMIENNICTWO

- [1] Beata Tarnacka, Paweł Turczyn, Klinika Rehabilitacji I Wydziału Lekarski Warszawskiego Uniwersytetu Medycznego Mazowieckie Centrum Rehabilitacji STOCER, Oddział Rehabilitacji w Warszawie, Zastosowanie robotyki w rehabilitacji zaburzeń chodu w schorzeniach neurologicznych, *Polski Przegląd Neurologiczny* 2017 14 (2): 63–73. ISSN 1734–5251.
- [2] Allan J. Kozłowski i wsp., Feasibility and Safety of a Powered Exoskeleton for Assisted Walking for Persons With Multiple Sclerosis: A Single-Group Preliminary Study, PMID: 28315666, DOI: 10.1016/j.apmr.2017.02.010, *Archives of physical medicine and rehabilitation* 2017 Jul;98(7):1300–1307.
- [3] Agnieszka Ciukso i wsp., Zakład Adaptowanej Aktywności Fizycznej i Sportu, Katedra Fizjoterapii, Wydział Nauk o Zdrowiu w Katowicach, Śląski Uniwersytet Medyczny w Katowicach, Zastosowanie egzoszkieletów w rehabilitacji, *Innowacyjne technologie we współczesnej rehabilitacji*, Redakcja naukowa: dr hab. n. o. zdrowia Ryszard Plinta prof. nadzw. SUM, ISBN 978-83-7509-349-0
- [4] Taimoor Afzal i wsp., Exoskeleton-assisted Gait Training in Persons With Multiple Sclerosis: A Single- Group Pilot Study, PMID: 31821798, DOI: 10.1016/j.apmr.2019.10.192, *Archives of physical medicine and rehabilitation* 2020 Apr;101(4):599–606.
- [5] Francois Bethoux, MD, The Cleveland Clinic, Pilot Study of Powered Exoskeleton Use for Gait Rehabilitation in Individuals With Multiple Sclerosis, *ClinicalTrials.gov* Identifier: NCT04000373, Last Update Posted: April 7, 2020.
- [6] Rakel Berriozabalgoitia i wsp., An Overground Robotic Gait Training Program for People With Multiple Sclerosis: A Protocol for a Randomized Clinical Trial, PMID: 32582732, DOI: 10.3389/fmed.2020.00238, *Frontiers of medicine* 2020 Jun 9;7:238.
- [7] Chris A. McGibbon i wsp., Evaluation of the Keeogo exoskeleton for assisting ambulatory activities in people with multiple sclerosis: an open-label, randomized, cross-over trial, PMID: 30541585, DOI: 10.1186/s12984-018-0468-6, *Journal of Neuroengineering Rehabilitation* 2018 Dec 12;15(1):117.
- [8] S. V. Kotov i wsp., The efficacy of the exoskeleton ExoAtlet to restore walking in patients with multiple sclerosis, PMID: 29359732, DOI: 10.17116/jnevro201711710241-47, *Zhurnal Nevrologii i Psikiatrii imeni S.S. Korsakova* 2017;117(10. Vyp. 2):41-47.
- [9] A. A. Gevorgyan i wsp., Robotic mechanotherapy in patients with multiple sclerosis with impaired walking function, PMID: 32790973, DOI: 10.17116/jnevro202012007129, *Zh Nevrol Psikhiatr Im S S Korsakova* 2020;120(7):29-34.
- [10] G. Puyuelo-Quintana i wsp., A new lower limb portable exoskeleton for gait assistance in neurological patients: a proof of concept study, PMID: 32375815, DOI: 10.1186/s12984-020-00690-6, *Journal of Neuroengineering Rehabilitation* 2020 May 6;17(1):60.
- [11] Matthias Szczesny-Kaiser i wsp., HAL® exoskeleton training improves walking parameters and normalizes cortical excitability in primary somatosensory cortex in spinal cord injury patients, PMID: 26289818, DOI: 10.1186/s12984-015-0058-9, *Journal of Neuroengineering Rehabilitation* 2015 Aug 20;12:68.
- [12] Emre Yilmaz i wsp., Does treadmill training with Hybrid Assistive Limb (HAL) impact the quality of life? A first case series in the United States, PMID: 30044680, DOI: 10.1080/17483107.2018.1493751, *Disability and Rehabilitation Assistive Technology* 2019 Jul;14(5):521-525.
- [13] Domien Gijbels i wsp., The Armeo Spring as training tool to improve upper limb functionality in multiple sclerosis: a pilot study, PMID: 21261965, DOI: 10.1186/1743-0003-8-5, *Journal of Neuroengineering Rehabilitation* 2011 Jan 24;8:5.
- [14] Ghaith J. Androwis i wsp., Mobility and Cognitive Improvements Resulted from Overground Robotic Exoskeleton Gait-Training in Persons with MS, PMID: 31946854, DOI: 10.1109/EMBC.2019.8857029, *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology* 2019 Jul;2019:4454-4457.
- [15] D. Kotzamani i wsp., Rising incidence of multiple sclerosis in females associated with urbanization, PMID: 22592376, DOI: 10.1212/WNL.0b013e31825830a9, *Neurology* 2012 May 29;78(22):1728-35.
- [16] N. Koch-Henriksen, P. Soelberg Sorensen, The changing demographic pattern of multiple sclerosis epidemiology, PMID: 20398859, DOI: 10.1016/S1474-4422(10)70064-8, *The Lancet Neurology* 2010; 9: 520-532.

KOMENTARZ RECENZENTA...

Prof. Dr. med. Dr. hc mult. W. Konrad Karcz PHM

Rozwój egzoszkieletów do celów terapeutycznych jest głównym przedmiotem zainteresowania robotyki rehabilitacyjnej. Robotyka rehabilitacyjna jest interdyscyplinarną dziedziną badań łączącą dziedziny elektrotechniki, mechaniki, informatyki, inżynierii biomedycznej, neurobiologii i rehabilitacji. Tematyka badań tej dziedziny nauki obejmuje: Rozwój kinematyki, Kontrole i regulacji pracy robotów, Systemy haptyczne, Dynamikę, Biomechanikę, Projektowanie interfejsu użytkownika, Biofeedback, Analizę ruchu i Badania kliniczne. Z pewnością ten temat będzie się pojawiać znacznie częściej w przyszłych publikacjach.

Roboty w Urologii i co dalej?

Głos Eksperta – UROLOGIA

KRZYSZTOF BORKOWSKI

Zespół Opieki Zdrowotnej, Oddział Urologii, Kłodzko

W medycynie zabiegowej stosowanie technik małoinwazyjnych stało się współcześnie faktem. Od przeprowadzonej w 2000 roku pierwszej robotowo wspomaganej prostatektomii radykalnej w USA upłynęło już 20 lat. Od tego momentu nastąpił proces ciągłej modyfikacji narzędzi wspomagających chirurga w precyzyjnym leczeniu operacyjnym. Obecnie światem istnieje ponad 5300 systemów robotycznych DaVinci. Ilość przeprowadzonych operacji z użyciem tego systemu robotycznego przekroczyła 1 000 000 i stale rośnie. Doświadczenie operatorów jest więc ogromne i wciąż wspomagane w praktyce zminiaturyzowanymi urządzeniami tzw. monoramiennymi systemami robotowymi. Warto wspomnieć, że system DaVinci w wersji standardowej składa się z konsoli, części roboczej umieszczonej na platformie. Ma ona bezpośredni kontakt z polem operacyjnym. Składa się z czterech przegubowych ramion wprowadzonych do pacjenta przez porty laparoskopowe: trzech z narzędziami wykonującymi ruchy zgodne z systemem EndoWrist – sztucznego nadgarstka; czwarte zaś – to kamera endoskopowa wykonana w technologii HD lub 3D z odpowiednim powiększeniem obrazu rzeczywistego. Konsola – miejsce pracy chirurga – zawiera układ optyczny, manetki sterujące, pedały, przyciski służące do uruchamiania między innymi koagulacji krwawiących tkanek czy ssania wydzielin tkankowych. Cały ten układ wspomaga pracę operatora – chirurga. Czynniki najbardziej korzystnymi dla tego wspomagania są: 1) eliminacja drżenia mięśniowego ręki chirurga co pozwala na precyzyjne ruchy, 2) powiększenie, dające możliwość operowania w przestrzeniach anatomicznych z precyzją i 3) niska traumatyzacja tkanek, 4) operowanie w miejscach trudno dostępnych anatomicznie. Te zalety zostały wykorzystane w leczeniu nowotworów urologicznych takich jak: rak stercza, pęcherza moczowego, nerki.

Najbardziej popularnym robotowym zabiegiem w urologii jest prostatektomia radykalna – metoda polegająca na usunięciu stercza. Lokalizacja narządu jest trudno dostępna – miednica mała za spojeniem lonowym – i dzięki zastosowaniu ramion robota z siedmioma stopniami swobody pozwala na jego precyzyjne usunięcie. Umożliwia to w pełni wykorzystać zalety chirurgii małoinwazyjnej dając tym

samym doskonały efekt onkologiczny, czynnościowy (pełne trzymanie moczu), świetny kosmetyczny i pełne bezpieczeństwo pacjenta.

Średni czas trwania operacji robotowych na poziomie eksperckim to około 3-5 godzin. W Polsce mamy obecnie dwa ośrodki w Krakowie i Warszawie wykonujących te operacje na poziomie eksperckim tj. ok. 1000 wykonanych zabiegów robotowych (przez operatora). Urologi wykonują te zabiegi z zastosowaniem odmiennych technik robotowych: są to techniki smart i collar osiągając podobne cele kosmetyczne, czynnościowe i onkologiczne. Dzięki tym technikom pacjent szybko wraca do pełnej sprawności zdrowotnej, utrzymanie cewnika dopęcherzowego trwa tylko dwa dni, a rekonwalescencja ok. 10 dni. Dla porównania w metodzie otwartej – tradycyjnej – okres rekonwalescencji trwa ok 30 dni. Czyż nie są to zalety metod robotowych?

System DaVinci podlega ciągłym ulepszeniom i modyfikacja m.in. redukcji ramion. Obecnie w USA zaczęto już stosować w praktyce klinicznej system mono portowych robotów (da Vinci SP Single Port, kamera i 3 elastyczne instrumenty wprowadzane są do ciała pacjenta przez jeden port o średnicy 2,5 cm) aby uzyskać jeszcze lepszy efekt kosmetyczny.

Liczba robotowych operacji w urologii stale rośnie ze względu na wzrost zachorowalności populacji ludzkiej na schorzenia onkologiczne i zalety urządzenia. Rak stercza jest na pierwszym miejscu chorób okolicznych mężczyzn na świecie. W Polsce, z ponad 10 letnim opóźnieniem, powstało 8 ośrodków wykonujących operacje robotowe.

Wymiana naukowa, doświadczenie, powstawanie nowych ośrodków wykonujących tego typu zabiegi oraz powstawanie nowych systemów robotycznych np. Robin Heart, powoduje, że ten sposób nowoczesnego, małoinwazyjnego, leczenia chirurgicznego, będzie ulegał coraz większej popularyzacji, a bariery finansowe zostaną z czasem zniesione. To jest przyszłość medycyny zabiegowej, nie tylko urologii ale innych działów chirurgii specjalistycznej: kardiologii, ginekologii, neurochirurgii.

Chętnych do obserwacji i nauki na poziomie eksperckim zachęcam do odwiedzania stron internetowych relacjonujących zabiegi in live np. WRSA.

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^{1,2},
DARIUSZ KRAWCZYK^{1,2}

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

²Katedra 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 zespołu 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 mc² (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 mc² 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 mc² jest oryginalnym, uniwersalnym robotem modułowym, narzędzia można szybko zdemontować z ramienia robota i sterować nimi ze specjalnego uchwytu w dłoni.

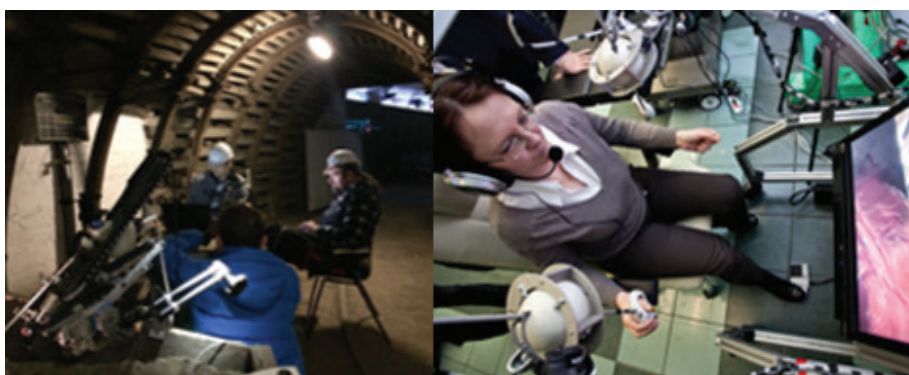
Modułowość oznacza też, że można pracować jednym ramieniem z platformą (narzędzie-wizja-narzędzie) 2+1 lub z dwoma asystującymi ramionami o dużej swobodzie ruchu (plus dwa narzędzia) czyli 4+1, lub ściągnąć platformę i na środkowym mamy wtedy tylko tor wizyjny (typowy układ 2+1 – czyli głowa w środku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

Robin Heart mc², 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 badania w Polsce badania w zakresie teleoperacji. Na zdjęciu po lewej eksperyment zdalnego sterowania robotem Robin Heart Pelikan w Kopalni Guido w Zabrzu (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 najprostszy, 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 mc². 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 opisie 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 zadowalający.

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 α 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 ΔW (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 (ΔP) 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 siły 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: kartezyjskim (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

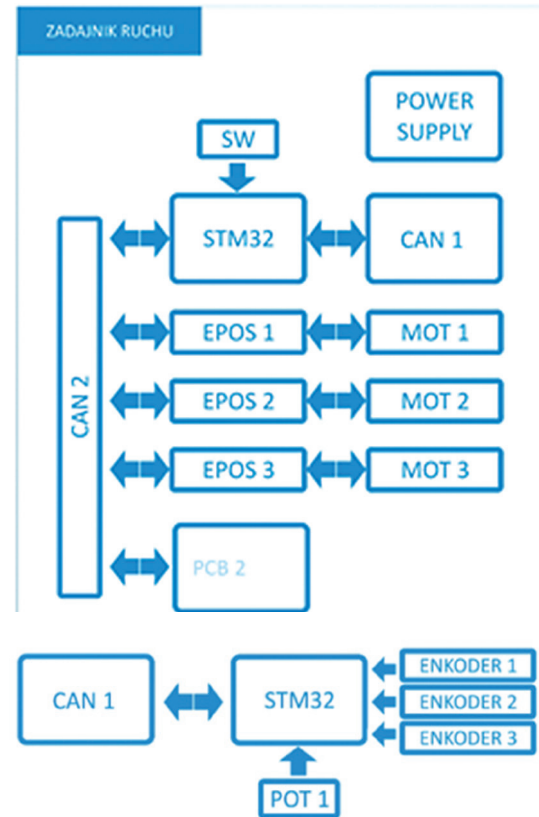
ta Robin Heart rozpoczęło się od badań... człowieka. Człowieka, który będzie operatorem robota, jego użytkownikiem, który będzie odpowiedzialny za cały przebieg operacji i jej efekty.

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 bezpośredniego 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 ($\leq 1\text{N}$) odbywał się z jak największą dokładnością. Z kolei przy pomiarze dużych sił ($> 1\text{N}$) 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.

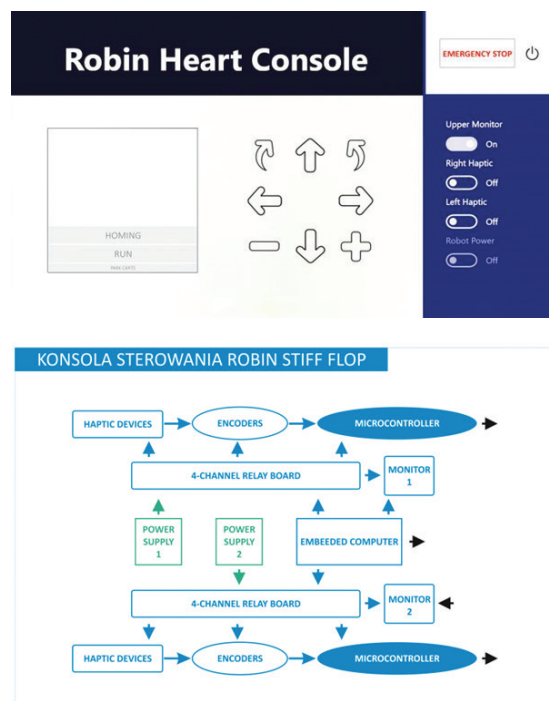
W artykule [9] opisano stanowisko badawcze (Rys. 4 i 6) optymalizacji działania systemu haptycznego sterowania złożone z konsoli sterowania RobinStif-Flop z zadajnikiem ruchu Robin Hand, robot Robin Heart PVA oraz narzędzie Robin Incite działają w systemie sterowania zamkniętego oraz wstępne wyniki badań. 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 przekąźnikowy układ zasilania umożliwiający włączanie i wyłączanie poszczególnych zespołów (urządzeń) peryferyjnych.

Sygnał, 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 opóźnień 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 – następca 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., Krocze 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., Földes P., Radó J., Dúcsó C., Santha H., Szabó 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. Podsumowanie 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.

Robotyka w medycynie zabiegowej – szanse i wyzwania w kształceniu lekarzy

Robotics in interventional medicine – opportunities and challenges in doctors education

Artykuł recenzowany

KRZYSZTOF STARSZAK¹
MICHAŁ SMOCZOK¹
WERONIKA STARSZAK¹

¹ Śląski Uniwersytet Medyczny
w Katowicach

Słowa kluczowe:
chirurgia, roboty medyczne,
narzędzia chirurgiczne,
edukacja medyczna

Keywords:
surgery, medical robots,
surgical instruments,
medical education

Streszczenie

Chirurgia robotyczna jest wdrażana w coraz większej liczbie ośrodków ochrony zdrowia na całym świecie. Szczególnie chętnie z robotów korzystają urolodzy, ginekolodzy, chirurdzy ogólni, kardiochirurdzy, neurochirurdzy. Poszukuje się dowodów skuteczności zastosowania robotów w kolejnych dziedzinach. Na rynku pojawiają się nowe rodzaje robotów stosowanych w chirurgii: roboty toru wizyjnego, manipulatory chirurgiczne, roboty nawigacyjne czynne i bierne, roboty biochirurgiczne. Rosnąca popularność robotyki medycznej powinna powodować zmiany w kształceniu nowych kadr. W artykule omówiono na podstawie przeglądu literatury oraz własnych doświadczeń (warsztatów chirurgicznych) aktualny stan i kierunki rozwoju edukacji w zakresie chirurgii robotycznej.

Abstract

Robotic surgery is being implemented in an increasing number of health care centers around the world. Urologists, gynecologists, general surgeons, cardiac surgeons and neurosurgeons are particularly willing to use robots. Evidence of the effectiveness of using robots in other areas is sought. New types of robots used in surgery are appearing on the market: endoscopic vision robots, surgical manipulators, active and passive navigation robots, and biosurgical robots. The growing popularity of medical robotics should cause changes in the education of new staff. The current state and directions of development of education in robotic surgery are discussed in the article on the basis of literature review and own experience (surgical workshops).

■ WSTĘP

Robotyka medyczna jest młodą dziedziną, rozwijającą się wskutek kooperacji specjalistów z zakresu nauk medycznych i inżynierii. Oczwistym celem operatorów jest minimalizowanie ryzyka śródoperacyjnego, ograniczenie utraty krwi, zmniejszenie liczby potencjalnych powikłań [1]. Wraz z rozwojem chirurgii, jako prężnie rozwijającej się dyscypliny medycznej, poszukiwano rozwiązań minimalnej inwazyjności, przy jednoczesnym zachowaniu optymalnego dostępu do operowanego obszaru. Ogromną rolę w diagnostyce przedoperacyjnej odegrały badania obrazowe, pozwalające na bardziej precyzyjny oraz lepszy jakościowo wgląd w ciało pacjenta.

Krokiem milowym dla światowej chirurgii było wynalezienie, opracowanie, a następnie wdrażanie na większą skalę laparoskopii, która coraz powszechniej jest wykonywana na całym świecie, również w Polsce. W programie szkolenia specjalizacyjnego każdego chirurga jest wykonanie zabiegów operacyjnych z wykorzystaniem tego narzędzia. Chirurgia małoinwazyjna koncentruje się na wykonaniu całości procesu operacyjnego przy zmniejszonym dostępie operacyjnym, co wpływa ograniczająco na możliwości zakażenia. Celem jest przyspieszenie rekonwalescencji pacjenta, zmniejszenie bólu, co wpływa na aspekt ekonomiczny – skrócenie czasu hospitalizacji. Intencją operatora powinno być również oszczędzanie zdrowego obszaru tkanek otaczających cel zabiegu oraz zmniejszenie ryzyka destrukcji naczyń krwionośnych i nerwów. Pomijając, lecz mając duże znaczenie, zwłaszcza dla pacjentów, jest aspekt estetyczny – chirurgia małoinwazyjna minimalizuje ryzyko wystąpienia szpecących blizn pooperacyjnych. Zdecydowanie młodszą, ale dającą równie wielkie nadzieje na rozwój podspecjalizacji chirurgicznych jest robotyka medyczna, której początki sięgają lat 80. XX w. Po raz pierwszy w medycynie, robota zastosowano w neurochirurgii. W 1985 r. w Long Beach, przy pomocy robota PUMA 560 wykonano biopsję, które były szybsze i bardziej precyzyjne, niż wykonywane uprzednio, klasycznymi metodami.[2] W 1988 r. przeprowadzono pierwszą resekcję gruczołu krokowego, co stanowiło preludium do rozwoju robotyki w urologii [3]. Kolejne lata przyniosły szereg postępów i modyfikacji. Ogromne znaczenie miało zaangażowanie ekspertów z NASA oraz U.S. Army [4]

Aktualnie chirurgia robotyczna jest wdrażana w coraz większej liczbie ośrodków ochrony zdrowia na całym świecie. Szczególnie chętnie z robotów korzystają urolodzy, ginekolodzy, chirurdzy ogólni, kardiochirurdzy, neurochirurdzy [5]. Wielu specjalistów z innego zakresu medycyny zabiegowej poszukuje zastosowania nowych rozwiązań w swoich dziedzinach – m.in. okuliści, czy ortopedzi. Na rynku

dostępne są różne rodzaje robotów chirurgicznych: roboty toru wizyjnego, manipulatory chirurgiczne, roboty nawigacyjne czynne i bierne, roboty biochirurgiczne [6]. Powstają coraz nowsze i lepsze konstrukcje, chętnie implementowane do codziennej praktyki lekarzy.

W Polsce od 2010 roku wykonuje się operacje na robocie Da Vinci, kiedy po raz pierwszy dokonano prostatektomii w Wojewódzkim Szpitalu Specjalistycznym we Wrocławiu przez prof. Witkiewicza z zespołem [7]. Nasz kraj ma również własną rodzinę robotów – Robin Heart, które są konstruowane w Fundacji Rozwoju Kardiochirurgii w Zabrze pod kierownictwem doc. Zbigniewa Nawrata [8, 9].

Rosnące zapotrzebowanie na roboty medyczne inicjuje i daje motywację do nieustannego rozwoju współpracy inżynierów z lekarzami, w zakresie ulepszania i tworzenia nowych narzędzi diagnostyki i terapii [10]. W obliczu tego faktu, konieczne jest również kształcenie specjalistów, lekarzy rezydentów, a także studentów, w zakresie teoretycznym i praktycznym do pracy z wykorzystaniem robotów w codziennej praktyce klinicznej.

■ MATERIAŁY I METODY

Dokonano przeglądu dostępnych polskich i zagranicznych publikacji naukowych, dostępnych w internecie w najpopularniejszych bazach, m.in. PubMed, Google Scholar oraz archiwalnych numerów Medical Robotics Reports. Pod uwagę brano prace przeglądowe i badania kliniczne. Ponadto wykorzystano raporty komercyjne oraz państwowe. Dokonano selekcji publikacji, najlepiej poruszających zagadnienie.

■ KORZYŚCI I WYZWANIA

Postęp, który nieustannie zachodzi w naukach medycznych, powoduje lepsze wyniki diagnostyki i leczenia oraz polepszenie jakości świadczeń. Rozwój nowych technologii w medycynie, stał się jej nieodłączną częścią, który obok wymiernych korzyści dla całego sektora ochrony zdrowia, stwarza także wyzwania, przed którymi muszą stanąć zarówno młodzi lekarze, jak i doświadczeni specjaliści. Robotyka medyczna jest dziedziną, która rozwija się w szybkim tempie, a ilość tego typu urządzeń stale się zwiększa. Cena za tego typu urządzenia uległa zmniejszeniu na przestrzeni lat, zwiększając tym samym możliwości potencjalnego kupna [11]. Szereg korzyści, wynikających z operowania przy udziale robotów, obejmujących m.in. precyzyjne wykonanie zabiegu, skrócenie czasu operacji, a następnie rekonwalescencji pacjenta, mniejsze blizny pooperacyjne, często mniejszy ból. Działanie robota charakteryzuje również powtarzalność i brak zmęczenia, co aktual-

nie jest problemem całego sektora ochrony zdrowia. Wskutek niewystarczającej liczby lekarzy oraz malejącej liczby operatorów, są oni zobligowani często do wielogodzinnej pracy, na granicy wytrzymałości fizycznej i psychicznej [12]. Roboty wpływają na ograniczenie koniecznej do wykonania zabiegu grupy zaangażowanego personelu, co stanowi oczywiste obciążenie zespołów. Coraz większy zakres działania robotów oraz ich interdyscyplinarność, powoduje wzrost zapotrzebowania na operatorów biegłych w zastosowaniu wdrażanych urządzeń, a tych będzie brakować. Niektóre uczelnie medyczne w Polsce umożliwiają rekrutację na studia dla osób po profilach matematyczno-fizycznych, które maturę zdają z przedmiotów innych niż biologia i chemia. Ma to wymiar symboliczny w kontekście zastosowania nowoczesnych technologii w medycynie. Zainteresowania młodych ludzi rozpoczynających studia, zogniskowane na programowaniu, technologii rozszerzonej rzeczywistości, robotyce, mogą przynieść rewelacyjne rezultaty dla rozwoju nauk medycznych. Programy nauczania dla studentów kierunku lekarskiego i lekarsko-dentystycznego powinny być w najbliższej przyszłości uzupełnione o podstawową wiedzę z zakresu wykorzystania nowych zdobyczy technologii, z uwzględnieniem ich nieustannej ewolucji i rozwoju. Programy specjalizacji z zakresu dyscyplin zabiegowych powinny również zawierać elementy wykorzystania robotów medycznych, rozszerzonej rzeczywistości, aplikacji medycznych w codziennej praktyce. Istotną rolę pełnią trenażery, które pozwalają zapoznać się z technikami oraz umożliwiają rozwój umiejętności manualnych. Dostęp do nich powinien być zapewniony nie tylko na rynku komercyjnym, fakultatywnie, ale jako nieodłączna część dydaktyki prowadzonej na uniwersytetach. Studenci kierunku lekarskiego w Zabrze, Śląskiego Uniwersytetu Medycznego w Katowicach już na pierwszym roku mają możliwość zapoznania się z zaawansowanymi technologiami medycznymi. Mają dostęp do ćwiczeń na trenażerach, tworzą własne projekty, które podlegają rzetelnej ocenie. Prowadzony w sposób autorski przez Zbigniewa Nawrata przedmiot jest wstępem do sześcioletniej akademickiej nauki medycyny i pozwala zainteresować przyszłych lekarzy technologią, w tym robotyką medyczną. Rozwiązaniem, które należy rozważyć, byłoby wprowadzenie podobnej formy dydaktyki, na każdym wydziale w Polsce. Działalność edukacyjna centrów akademickich jest wspomagana przez rozwijające się medyczne ośrodki prywatne rozszerzające swoją ofertę o profesjonalne szkolenia lekarzy np. w zakresie chirurgii robotowej jak w krakowskim Szpitalu na Klinach (Grupa Neo Hospital).

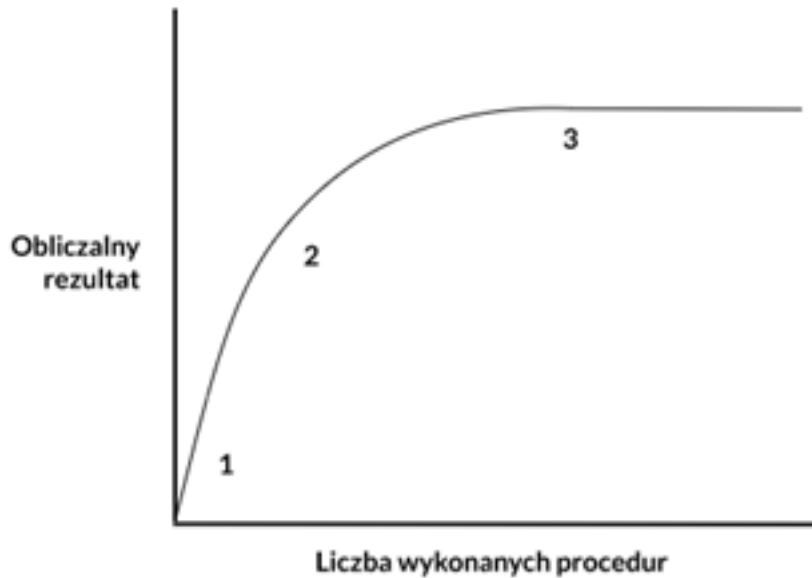
Szacuje się, że liczba robotów stosowanych w medycynie zabiegowej zwiększy się na przestrzeni najbliższych lat. By sprostać wymaganiom cywili-

zacyjnym, powinna się rozpocząć wielowymiarowa współpraca różnych środowisk [13].

Zainteresowanie studentów innowacyjnym podejściem do wybranego zawodu odbywa się nie tylko w zakresie realizowanego przedmiotu „Sztuczne narządy”, ale również w ramach Studenckiego Koła Naukowego im. Prof. Religi, które działało na przestrzeni lat przy Katedrze i Klinice Kardiologii, Transplantologii, Chirurgii Naczyniowej i Endowaskularnej, a obecnie przy Katedrze Biofizyki Śląskiego Uniwersytetu Medycznego. Studenci, którzy rozwijali swoje zainteresowania pod patronatem dr hab. n. med. Zbigniewa Nawrata – opiekuna – są aktualnie czynnymi specjalistami w wielu dziedzinach medycyny, również zabiegowej, osiągając sukcesy w pracy zawodowej i naukowej. Również studenci, zaangażowani od I roku, dzięki nabywanemu doświadczeniu, ciekawym i inspirującym spotkaniom oraz wspólnej pracy, wielokrotnie byli współautorami publikacji naukowych, prelegentami na rozmaitych wydarzeniach, również o statucie międzynarodowym. Ówczesny Przewodniczący – wówczas student IV roku – Dr Jacek Jankowski, przeprowadził wykład dla senatorów RP w siedzibie wyższej izby polskiego parlamentu na temat dziesięcioletniego doświadczenia związanego z organizacją warsztatów chirurgicznych. Konferencja BioMedTech Silesia i towarzyszące jej Warsztaty chirurgiczne, organizowane od 20 lat w Fundacji Rozwoju Kardiologii FRK przyciągają co roku do Zabrza setki osób - zainteresowanych uczniów, studentów, pracowników naukowych oraz naukowców o renomie międzynarodowej. To platforma wymiany myśli i poglądów oraz prezentacji osiągnięć. Warsztaty organizowane są przez Pracownię Biocybernetyki FRK doświadczoną w tworzeniu mechatronicznych narzędzi i robotów medycznych, a także stanowisk badawczych razem ze studentami Koła Naukowego, obecnie nazwanego Studenckim Kołem Naukowym im. prof. Zbigniewa Religi. Studenci Koła wykonywali wiele własnych badań naukowych, których wyniki były prezentowane na licznych konferencjach o randze krajowej i międzynarodowej oraz opublikowanych w wielu czasopismach [14, 15]. Metody edukacyjne w chirurgii oraz nowe rozwiązania w robotyce są szczególnym przedmiotem zainteresowań Koła [16, 17]. W ramach SKN im. Prof. Zbigniewa Religi odbywają się również wykłady, seminaria oraz zajęcia praktyczne z zakresu chirurgii, robotyki, nowych technologii i badań obrazowych

KONIECZNOŚĆ WYZNACZANIA KRZYWEJ UCZENIA SIĘ DLA OPERATORÓW MEDYCZNYCH

Krzywa uczenia się jest niezwykle przydatnym narzędziem w opracowywaniu modeli kształcenia kadry medycznej. Obrazuje korelację pomiędzy zmienną



niezależną jaką w badaniach stanowi najczęściej czas poświęcony na naukę danego zagadnienia, a zmienną zależną, którą stanowi stopień posiadanych umiejętności [18]. Każdorazowe wdrożenie chirurga w prawidłowe wykonanie procedury medycznej wymaga zagospodarowania zasobów. Stąd też niezwykle istotnym jest określenie punktu, na krzywej, w którym chirurg jest zdolny do samodzielnego podjęcia wykonania danego zabiegu [19].

W jej klasycznym przebiegu (odnoszącym się do zdobywania umiejętności wcześniej nieposiadanej) możemy wyróżnić 3 fazy krzywej uczenia się (Ryc. 1). W fazie pierwszej (1) operator podejmuje naukę danego zagadnienia zaczynając od danego dla niego stopnia predyspozycji. Wraz z postępem czasowym (ilością wykonanych prób) następuje poprawa umiejętności (2) aż do osiągnięcia poziomu plateau (3), w którym niezależnie od poświęconego nakładu, rezultat pozostaje niezmienny [20].

Dokonanie analizy statystycznej zabiegów wykonywanych przez populację lekarzy zabiegowych pod kątem procesu uczenia się stanowi jedno z wyzwań współczesnej medycyny. Z uwagi na małą dostępność robotów medycznych powinniśmy maksymalizować ich wykorzystanie w celach zabiegowych z zachowaniem roli edukacyjnej w kształceniu nowego pokolenia operatorów.

Obecnie brak jest standaryzacji modeli kształcenia operatorów w oparciu o krzywe uczenia się. Ma to związek przede wszystkim z rozbieżnością założeń podczas ich tworzenia. W literaturze występują odmienności dotyczące definiowania pozytywnego rezultatu kształcenia [21]. Stąd też bardzo utrudnionym jest porównywanie krzywych uczenia się na podstawie dostępnych badań klinicznych i ich

interpretacja pod kątem optymalizacji procesu edukacji. Mamy coraz więcej dowodów, że w kilku dziedzinach telemanipulatory chirurgiczne zwiększają skuteczność interwencji medycznej i są łatwiejszym narzędziem dla nauki.

Przykładowo - zgodnie z badaniami Melich'a, porównującymi skuteczność wykonywania zabiegów metodami robotycznymi i laparoskopowymi, zaobserwować można znaczną poprawę zdolności wykonywania zabiegów robotycznych w obrębie odbytnicy już po 41 przeprowadzonych zabiegach (w tym wypadku czas wykonania zabiegu przyjmowany jest jako przesłanka do oceny zdolności operatora), względem analogicznych procedur wykonywanych metodami klasycznej laparoskopii, po wykonaniu 41 zabiegów obserwowano stałą progresję w skracaniu czasu wykonywania TME (całkowite wycięcie mezorektum) [22].

Proces kształcenia chirurga zależy w znacznej mierze od jego doświadczenia w przeprowadzaniu zabiegów laparoskopowych, ilości godzin spędzonych na symulatorach oraz praktyki w wykonywaniu innych zabiegów z użyciem robotów.

Wraz ze wzrostem dostępności robotyki medycznej w Polsce i na świecie, możliwym będzie uzyskanie większej ilości danych dotyczących poprawy umiejętności operatorów i wykorzystanie ich do jak najszybszego wdrożenia kadry w samodzielną praktykę.

WYKORZYSTANIE TECHNOLOGII WIRTUALNEJ RZECZYWISTOŚCI JAKO NARZĘDZIA DO KSZTAŁCENIA KADRY OPERATORÓW ROBOTÓW MEDYCZNYCH

W ostatnich latach obserwujemy gwałtowny rozwój technologii z zakresu wirtualnej i rozszerzo-

nej rzeczywistości. Na rynku dostępnych jest wiele rozwiązań, z których część wykorzystywana jest na salach operacyjnych na całym świecie. Narzędzie to z powodzeniem może być wykorzystane do planowania przedoperacyjnego, poszerzania wizualizacji anatomii pacjenta podczas zabiegów otwartych jak również w przypadku procesów kształcenia kadry medycznej [23].

Technologia wirtualnej rzeczywistości pełni również istotną rolę w przypadku kształcenia operatorów robotów medycznych. Swoją podstawę znajduje to między innymi w dysproporcji pomiędzy dostępnością klasycznych metod chirurgii otwartej i laparoskopowej, a metodami robotycznymi. Stąd istnieje konieczność stworzenia rozwiązań umożliwiających zapoznanie się z konsolą sterującą i przeprowadzenie symulacji odpowiadających rzeczywistym zabiegom.

Na rynku istnieje kilka komercyjnych systemów symulacji robotyki medycznej (dVSS, RoSS, Mimic dV-Trainer, SEP) [24]. Część z nich jak dVSS (da Vinci Skills Simulator) dedykowana jest do edukacji w kontekście jednej platformy. Inne pozwalają na bardziej interdyscyplinarne nabycie umiejętności operatorskich. Zastosowanie platform stanowi konkurencję pod względem kosztów kształcenia względem nauki na samych robotach. Co więcej zapewnia większą mobilność.

Dyskusyjną jest jednak kwestia, czy możliwym jest kształcenie kadry operatorów z pominięciem klasycznego mentorskiego modelu obecnego w praktyce zabiegowej. Obecnie istniejące symulatory wykorzystujące technologię wirtualnej rzeczywistości stanowią bowiem niewystarczające narzędzie, wymagające dalszego rozwoju [25].

Metaanalizy dostępnych badań klinicznych wykazują zatem pilną konieczność pogłębiania skuteczności zastosowania symulatorów medycznych w kształceniu nowego pokolenia operatorów. Preferowanym byłoby stworzenie wielośrodkowego badania odnoszącego się do metod wirtualnej rzeczywistości jako właściwego narzędzia dydaktycznego [26].

Niewątpliwie obiecującym kierunkiem rozwoju technik wirtualnej rzeczywistości jest utrzymywanie manualnych zdolności chirurgicznych podczas okresów przerwy w wykonywaniu operacji. Co więcej podczas wykonywania symulacji, można liczyć na poprawę niektórych umiejętności [27].

ROLA KOOPERACJI ZESPOŁU W ZABIEGACH ROBOTYCZNYCH

Zaadoptowanie robotów w codziennej praktyce klinicznej nie jest jednak rozwiązaniem prostym i oczywistym do wprowadzenia, pomimo oczywi-

stych korzyści. Minusem użytkowania są koszty jednorazowego kupna sprzętu, brak refundacji takich zabiegów, kosztowne serwisowanie, ale również poruszany przez nas aspekt nauki operatorów [28]. Co więcej, autorzy badań, zwracają uwagę na aspekt oczywistego obciążenia operatorów, ale również dodatkowe obciążenie pozostałych członków zespołu [29]. Pielęgniarki mają bardzo duży udział w koordynacji działań bloku operacyjnego oraz stanowią ważną część zespołów operacyjnych, bez względu na specjalizację, w obszarze których działają lekarze. W kontekście chirurgii robotycznej należy wspomnieć o konieczności edukacji pielęgniarek, uwzględniając sytuacje kryzysowe, zdolność przewidywania możliwych wariantów rozwoju operacji. Konieczne jest ukierunkowanie specjalistyczne, ale również program podstawowy w zakresie wykształcenia pielęgniarek [30]. Długotrwała praca na sali operacyjnej, zwłaszcza w tym samym zespole, pozwala na wzajemne poznanie własnych umiejętności, reakcji na sytuacje stresowe oraz wypracowanie sprawnej komunikacji, która jest niezbędna, przede wszystkim w sytuacjach kryzysowych. Aby zwiększyć szanse na odpowiednią, bezpieczną opiekę nad pacjentami, pielęgniarki – członkowie zespołów operacyjnych powinny nabierać jak największej praktyki, a ich szkolenie powinno być standaryzowane, by komunikacja między personelem była możliwie sprawna. Również kwestia przygotowania sprzętu powinna być istotnym aspektem [31]. Warto zwrócić uwagę na fakt, że operator jest odseparowany od pozostałych członków zespołu i to właśnie odpowiednia komunikacja, może mieć decydujący wpływ na powodzenie zabiegu i najlepszą opiekę nad pacjentem [32].

W opublikowanym w 2014 roku raporcie dotyczącym największych zagrożeń dla technologii medycznych autorzy wskazali powikłania, z powodu niewystarczającego szkolenia w obszarze robotyki medycznej. Wyzwania, które stoją przed implementującymi technologię w tym obszarze, to m.in. szkolenie drużynowe i szkolenie personelu pomocniczego, o czym wspomniano wcześniej, jak również częste, regularne korzystanie ze sprzętu, etc [33].

ASPEKT BEZPIECZEŃSTWA W ROBOTYCE MEDYCZNEJ

Ważnym, choć często pomijanym aspektem jest kwestia awaryjności sprzętu robotycznego. Oczywistym jest proces kontroli i certyfikacji wymagany przed dopuszczeniem każdorazowo nowego urządzenia do użytkowania w praktyce klinicznej. Ma on na celu minimalizację ryzyka wystąpienia awarii robotów. Jednak w przeciwieństwie do przyrządów wykorzystywanych w konwencjonalnej chirurgii i chirurgii laparoskopowej, jakkolwiek dysfunkcja

sprzętu robotycznego niesie ze sobą nieporównywalnie większe implikacje. W analizie 3935 przypadków, przeprowadzonej przez A. Tappera z zespołem (Styczeń 2014-Czerwiec 2017) wyodrębniono 247 zgłoszonych usterek oprzyrządowania [34]. Do najczęściej zgłaszanych dysfunkcji sprzętowych należały awarie samych narzędzi i okablowania. Jednak jedynie w 57,9% przypadków, producent sprzętu dokonywał zwrotu kosztu za poniesione naprawy z uwagi na częste zjawisko niepoprawnego użycia narzędzi (względem zalecanego) przez operatorów.

Z powodu wysokich kosztów, jego dostępność jest ograniczona zwykle do jednego/kilku robotów przypadających na dany ośrodek. Stąd też problemy związane z serwisowaniem i naprawą robotów medycznych prowadzą niejednokrotnie do konieczności zaniechania wykonywania danego zabiegu na dłuższy okres czasu co przekłada się na realne straty finansowe. Awaria może wystąpić podczas operacji ale robot nie może wykonać żadnego ruchu bez właściwej decyzji operatora. W takich przypadkach odsuwa się robota od stołu operacyjnego i następuje konwersja metody operacyjnej na metodę otwartą.

Coraz częściej zwracana jest uwaga opinii publicznej na aspekt bezpieczeństwa operacji wykonywanych przy użyciu robotów medycznych. Analiza 10624 zgłoszeń dokonanych do FDA (U. S. Food and Drug Administration), indeksowanych w amerykańskiej bazie MAUDE, dokonanych w okresie 2000-2013 ujawniła zarys struktury najczęściej pojawiających się zdarzeń niekorzystnych związanych z robotyką medyczną. [35]. Przeważającą ilość zgłaszanych incydentów stanowiły dysfunkcje sprzętu – 75,9%. Zdarzenia skutkujące zranieniem pacjenta bądź jego śmiercią stanowiły kolejno 13,1% oraz 1,4%. Ciekawego porównania użyli J.W. Collins oraz P. Wisz, którzy zauważyli podobieństwo między szkoleniem chirurgów, pracujących na robotach medycznych, a pilotami samolotów. [36]. Zarówno jedna, jak i druga grupa pracuje z wykorzystaniem nowoczesnych i bardzo złożonych rozwiązań technologicznych. Są oni również poddani dużemu obciążeniu psychicznemu i stresowi. Nie bez znaczenia pozostaje również odpowiedzialność za życie i zdrowie człowieka, któremu służą. Warto jednak podkreślić, że szkolenie lotnicze, jest dostosowane do aktualnych potrzeb, które zostały zbudowane na wieloletnich doświadczeniach, uwzględniających wymagania i wielowymiarowy rozwój w zakresie lotnictwa. Analogicznie wypracowane schematy, są również potrzebne w robotyce medycznej – głównie w jej implementacji do codziennej praktyki klinicznej.

WNIOSKI

- Należy opracować i wdrażać program kształcenia studentów i młodych lekarzy, obejmujący zakre-

KOMENTARZ RECENZENTA...

Krzysztof Mianowski, dr inż., Politechnika Warszawska

W artykule poruszono ważny i bardzo aktualny problem kształcenia młodych lekarzy w dziedzinie nowoczesnych technik medycznych/chirurgicznych i w szczególności w dziedzinie robotyki medycznej. W sposób przystępny i czytelny autorzy przybliżają czytelnikowi problematykę nowoczesnych zabiegów operacyjnych oraz jej różne aspekty związane z koniecznością kształcenia w tym zakresie. We wnioskach, w końcowej części pracy, autorzy przedstawiają własny zbiór założeń i program niezbędnych działań mający na celu skuteczne wprowadzenie robotyki medycznej do codziennej praktyki leczenia pacjentów.

Prof. dr hab. Stanisław Mitura, dr hc TUL Wydział Nauk o Zdrowiu, Akademia Kaliska

Interesujący przegląd stosowania nowoczesnych technik inżynierii medycznej. Autorzy sugerują: „Należy opracować i wdrażać program kształcenia studentów i młodych lekarzy, obejmujący zakresem wykorzystanie nowych technologii, w tym robotów medycznych oraz wirtualnej rzeczywistości.” Niewątpliwie, brakuje kształcenia specjalistów, lekarzy rezydentów, a także studentów, w zakresie teoretycznym i praktycznym do pracy z wykorzystaniem robotów w codziennej praktyce klinicznej.

Prof. Dr. med. Dr. hc mult. W. Konrad Karcz PHM

Jestem wdzięczny, że tak ważny dla dalszego rozwoju medycyny temat został przyjęty do publikacji i znalazł miejsce w Journalu. Wykorzystując okazję chciałbym zasygnalizować ważny problem w kształceniu specjalizacyjnym. W zakresie manipulatorów chirurgicznych w chwili obecnej w znakomitej większości przypadków treningi są w rękach firm produkujących roboty. Przez ten fakt dostępność w różnych częściach globu do technologii jest bardzo zróżnicowana. A przez takie systematyczne przejmowanie kształcenia medycznego ulegamy jako grupa specjalistów zabiegowych manipulacji marketingowej firm sprzedających zaawansowany sprzęt medyczny. Tym samym, rozczarowującym jest fakt że zainteresowanie zagadnieniem, nie jest wystarczającym czynnikiem aby podjąć szkolenie w tym zakresie, najczęściej warunkiem koniecznym jest zakup sprzętu firmy aby taka możliwość otrzymać. Biorąc pod uwagę tylko Unie Europejska i równorzędność kwalifikacji, gwarantowanej prawem, obecna polityka przekreśla możliwość wolnej konkurencji, a możliwość ubiegania się o stanowiska kierownicze w klinikach chirurgicznych, pozostaje tylko teoretycznym postulatem. Tutaj, zdecydowana rola powinny tu odegrać narodowe Towarzystwa Chirurgiczne, gdzie solidarność i dobro przyszłych pokoleń chirurgów powinny wziąć gore nad politycznymi podziałami. Konieczne jest wypracowanie doktryny unijnej w zakresie kształcenia obejmującego nowe technologie, celem powstania na każde 30 milionów mieszkańców uni centrum treningowe umożliwiające dostęp do technologii wszystkim ubiegającym się o specjalizację zabiegową. W przyszłości ukończenie takiego kursu powinno być warunkiem koniecznym do przystąpienia do egzaminu specjalizacyjnego. Celem wspierania integracji europejskiej centra kształcenia powinny być lokalizowane tylko w euroregionach z różnymi kulturami, co powinno służyć wymianie międzynarodowej, wspomagając przepływ ludności i wzmacniać integrację europejską.

sem wykorzystanie nowych technologii, w tym robotów medycznych oraz wirtualnej rzeczywistości.

- Wzrost świadomości pacjentów, zwiększenie dostępności oraz spadek cen, mogą się przyczynić do zwiększenia rynku robotów medycznych w Polsce.
- Zapotrzebowanie na roboty medyczne oraz nowe technologie będzie rosnąć, zatem konieczne jest kształcenie kadr, by zaspokoić potrzeby systemu ochrony zdrowia w najbliższej przyszłości.
- Zasadne wydaje się dalsze prowadzenia badań, mających na celu standaryzację wymogów stawianych przyszłym operatorom, wykorzystującym roboty w praktyce klinicznej.
- Koniecznym wydaje się stworzenie wielośrodkowego badania mającego na celu standaryzację procedur kształcenia operatorów robotów medycznych w oparciu o analizę wieloczynnikową
- Istnieje potrzeba stworzenia programów szkoleniowych o podejściu holistycznym – biorącym pod uwagę również personel medyczny towarzyszący operatorom robotów chirurgicznych, celem poprawy ergonomii pracy i standaryzacji postępowania.
- Wskazano jest dokonywanie ewidencji przeprowadzanych zabiegów z udziałem robotów medycznych oraz ścisła kontrola komplikacji i błędów medycznych, celem wypracowania szeregu procedur kryzysowych, w przypadku wystąpienia problemów w trakcie operacji.

BIBLIOGRAFIA:

- [1] AlAsseri N, Swennen G. Minimally invasive orthognathic surgery: a systematic review. *Int J Oral Maxillofac Surg.* 2018;47(10):1299-1310.
- [2] Kwok Y.S., Hou J., Jonckheere E.A. A robot with improved absolute positioning accuracy for CT guided stereotactic brain surgery. *IEEE Trans Biomed Eng.* 1988; 35: 153–160
- [3] Davies B. L., Hibberd R. D., Coptcoa, M. J., Wickham J. E. A. A surgeon robot prostatectomy – a laboratory evaluation. *J. Med. Engng and Technol.* 1989; 13
- [4] George E. I., Brand T.C., LaPorta A., Marescaux J., Satava R.M. Origins of Robotic Surgery: From Skepticism to Standard of care. *JSLs.* 2018; 22(4)
- [5] Zdrojewicz Z., Witkiewicz W., Dołowiec A., Głód J. Robotyka w Medycynie, Robotics in medicine. *Chirurgia Polska.* 2014; 16 (2): 84-90
- [6] Nawrat Z. Roboty i manipulatory w medycynie. *Mechanika Techniczna.* Tom 12. Biomechanika. Red. R. Będziński. 2011: 753–827.
- [7] Witkiewicz W., Jastrzębski J., Sokołowski J. i wsp. Chirurgia robotowa – historia rozwoju. *Przegląd Urologiczny.* 2011; 6: 66–73.
- [8] Nawrat Z. State of the art in medical robotics in Poland: development of the Robin Heart and other robots. *Expert Review of Medical Devices.* 2012; 9: 353-359
- [9] Nawrat Z, Kostka P. Polish cardio-robot 'Robin Heart'. System description and technical evaluation. *Int J Med Robot.* 2006; 2(1): 36-44
- [10] Armijo P.R., Pagkratis S., Boilesen E., Tanner T., Oleynikov D. Growth in robotic-assisted procedures is from conversion of laparoscopic procedures and not from open surgeons' conversion: a study of trends and costs. *Surg Endosc.* 2018; 32: 2106-2113
- [11] Nawrat Z. Robotyka medyczna w Polsce. *Medical Robotics Reports.* 2012; 1: 7-16
- [12] Zgliczyński W.S. Kadry Medyczne w Polsce. *INFOS.Biuro Analiz Sejmowych.* 2016; 210 (6)
- [13] PMR, Upper Finance. Rynek robotyki chirurgicznej w Polsce 2019. Prognozy rozwoju na lata 2020-2023. 2019
- [14] Niemiec A., Odziemek M., Oleksik N. et al. Robot Domowy – Home Medical Robot. *Medical Robotics Reports.* 2015;4:61-64
- [15] Smoczok M., Starszak K. Tematyka transplantologii dziecięcej wśród rodziców, na terenie województwa śląskiego. *Polski Przegląd Nauk o Zdrowiu.* 2018;4(57):439–443.
- [16] Pytlos M., Nawrat A., Musik D., et al. Porównanie metod edukacyjnych w chirurgii- stanowiska treningowe kontra symulacje komputerowe. *BioMedTech Silesia* 2012
- [17] Smoczok M., Starszak K. Robotyka w endoskopii – wizualizacja w postaci modelu fizycznego. *BioMedTech Silesia* 2018
- [18] Pernar LIM, Robertson FC, Tavakkoli A, Sheu EG, Brooks DC, Smink DS. An appraisal of the learning curve in robotic general surgery. *Surg Endosc.* 2017;31(11):4583-4596.
- [19] Kassite I, Bejan-Angoulvant T, Lardy H, Binet A. A systematic review of the learning curve in robotic surgery: range and heterogeneity. *Surg Endosc.* 2019;33(2):353-365.
- [20] Andolfi C, Umanskiy K. Mastering Robotic Surgery: Where Does the Learning Curve Lead Us?. *J Laparoendosc Adv Surg Tech A.* 2017;27(5):470-474.?
- [21] Mazzon G, Sridhar A, Busuttill G, et al. Learning Curves for Robotic Surgery: a Review of the Recent Literature. *Curr Urol Rep.* 2017;18(11):89. Published 2017 Sep 23.
- [22] Melich G, Hong YK, Kim J, et al. Simultaneous development of laparoscopy and robotics provides acceptable perioperative outcomes and shows robotics to have a faster learning curve and to be overall faster in rectal cancer surgery: analysis of novice MIS surgeon learning curves. *Surg Endosc.* 2015;29(3):558-568.
- [23] Bernardo A. Virtual Reality and Simulation in Neurosurgical Training. *World Neurosurg.* 2017;106:1015-1029.
- [24] Bric JD, Lombard DC, Frelich MJ, Gould JC. Current state of virtual reality simulation in robotic surgery training: a review. *Surg Endosc.* 2016;30(6):2169-2178.
- [25] Lee GI, Lee MR. Can a virtual reality surgical simulation training provide a self-driven and mentor-free skills learning? Investigation of the practical influence of the performance metrics from the virtual reality robotic surgery simulator on the skill learning and associated cognitive workloads. *Surg Endosc.* 2018;32(1):62-72.
- [26] Moglia A, Ferrari V, Morelli L, Ferrari M, Mosca F, Cuschieri A. A Systematic Review of Virtual Reality Simulators for Robot-assisted Surgery. *Eur Urol.* 2016;69(6):1065-1080.
- [27] Guseila LM, Saranathan A, Jenison EL, Gil KM, Elias JJ. Using virtual reality to maintain surgical skills during periods of robotic surgery inactivity. *J Robot Surg.* 2014;8(3):261-268.
- [28] Catchpole K, Bisantz A, Hallbeck MS, et al. Human factors in robotic assisted surgery: Lessons from studies 'in the Wild'. *Appl Ergon.* 2019;78:270-276.
- [29] Catchpole K, Bisantz A, Hallbeck MS, et al. Human factors in robotic assisted surgery: Lessons from studies 'in the Wild'. *Appl Ergon.* 2019;78:270-276.
- [30] Kang MJ, De Gagne JC, Kang HS. Perioperative Nurses' Work Experience With Robotic Surgery: A Focus Group Study. *Comput Inform Nurs.* 2016;34(4):152-158.
- [31] Pograjec A, Hubert J. Le rôle de l'IBODE en chirurgie robotique urologique [The nurse's role in urologic robotic surgery]. *Prog Urol.* 2019;29(15):899-903.
- [32] Gill A, Randell R. Robotic surgery and its impact on teamwork in the operating theatre. *J Perioper Pract.* 2016;26(3):42-45.
- [33] ECRI Institute (2014) Top 10 Health Technology Hazards for 2015. *Health Devices.* https://www.ecri.org/Resources/Whitepapers_and_reports/Top_Ten_Technology_Hazards_2015.pdf. Accessed May 2020.
- [34] Tapper A, Leale D, Megahan G, Nacker K, Killinger K, Hafron J. Robotic Instrument Failure-A Critical Analysis of Cause and Quality Improvement Strategies. *Urology.* 2019;131:125-129.
- [35] Alemzadeh H, Raman J, Leveson N, Kalbarczyk Z, Iyer RK. Adverse Events in Robotic Surgery: A Retrospective Study of 14 Years of FDA Data. *PLoS One.* 2016;11(4):e0151470. Published 2016 Apr 20.
- [36] Collins JW, Wisz P. Training in robotic surgery, replicating the airline industry. How far have we come? [published online ahead of print, 2019 Oct 17]. *World J Urol.* 2019;10.1007/s00345-019-02976-4.

ROBOTY ZROBIONE PRZEZ
CZŁOWIEKA NA ZIEMI,
BY KONIECZNE STAŁO SIĘ
OSIĄGALNE



MAN-MADE ROBOTS
ON EARTH TO MAKE
WHAT NECESSARY
BECOME ACHIEVABLE

POWSTALIŚMY, by rzeczy PROSTE stały się MOŻLIWE
By co KONIECZNE stało się OSIĄGALNE

ROBOTYZUJEMY STOMATOLOGIĘ

iDentON

To TY decydujesz.
ON robi.

Naszym celem jest zbudowanie robota – autonomicznego dentystę – który poleci
z wyprawą człowieka na Księżyc czy na Marsa – trafi tam gdzie potrzeba.

Bo Człowiek czasem potrzebuje pomocy fachowca.

Ale zanim to nastąpi zmienimy gabinety stomatologiczne na Ziemi tworząc nowe standardy
nauczeni też przez pandemię, że zbyt często rzeczy proste są niemożliwe, konieczne – nieosiągalne.

www.iDentON.pl

The Cybernetic Hospitals Revolution in the Age of Artificial Intelligence

Artykuł recenzowany

W. KONRAD KARCZ¹

DORIAN ANDRADE²

¹ Prof. Dr. med. Dr. h.c. mult.

W. Konrad Karcz PHM

Head of Division Minimally Invasive Surgery

Clinic for General,

Visceral and Transplant Surgery

Hospital of the LMU Munich

- Campus Großhadern

Marchioninistrasse 15 - D-81377 Munich

Phone +49 89 4400 73560

konrad.karcz@med.uni-muenchen.de

² Dr. med. Dorian Andrade

Clinic for General,

Visceral and Transplant Surgery

Hospital of the LMU Munich

- Campus Großhadern

Marchioninistrasse 15 - D-81377 Munich

Phone +49 89 4400 0

dorian.andrade@med.uni-muenchen.de

Słowa kluczowe:

sztuczna inteligencja, zarządzanie szpitalem,
efektywność usług zdrowia,
szpital cybernetyczny

Keywords:

artificial intelligence,
hospital management,
efficiency of health services,
cybernetic hospital

Abstract

AI can lead to better care outcomes and improve the productivity and efficiency of care delivery. It can also improve the day-to-day life of healthcare practitioners, letting them spend more time looking after patients and in so doing, raise staff morale and improve retention. It can even get life-saving treatments to market faster. At the same time, questions have been raised about the impact AI could have on patients, practitioners, and health systems, and about its potential risks; there are ethical debates around how AI and the data that underpins it should be used. This short article aims to contribute to the debate surrounding AI in Hospitals, specifically looking at how practitioners and organizations will be affected.

INTRODUCTION

Today the cybernetical revolution influence strongly the field of medicine. The issue is not new, the first publications appeared in 1951 by Neurologists Dr. Flettcher (*Flettcher K.H. Matter with a mind; a neurological research robot. Research. 1951 Jul;4(7):305-7.*) followed by Anesthesiologist Dr. Harward in 1952 (*Harward L.R. The robot anesthetist; an introduction to the automatic control of anesthesia using an electro-encephalographic intermediary. Med World. 1952 Aug 8;76 (23):624-6.*). A Pubmed literature review with the search terms „Artificial Intelligence“ (AI) shows 100987 results. In comparison a google search review shows 629000000 results, hence the medical scientific world does not present itself as ultra-modern. The time of change came, accelerated with the pandemic crisis, which pushed all of us into the Virtual World. All areas of medicine

will evolve very quickly. In our development, we are somewhere between Medical Art and sophisticated mathematical big data multivariable probabilities calculus. Healthcare financials have many complex financial aspects influenced by political systems, religion, and social development. Local development status influences the number of financial resources invested and influencing the effectiveness of their application. By a fast-growing population, it would be very difficult to include everyone in the global healthcare system. The central healthcare financing, using only the economic processing, leads to the grey zone of ethics. For example the DRG systems shows exploding counts of special well paid procedures with narrow specialization with leading examples of last year's growing counts of spine surgeries or oncological therapies. At the same time, we have growing number of patients who are searching for

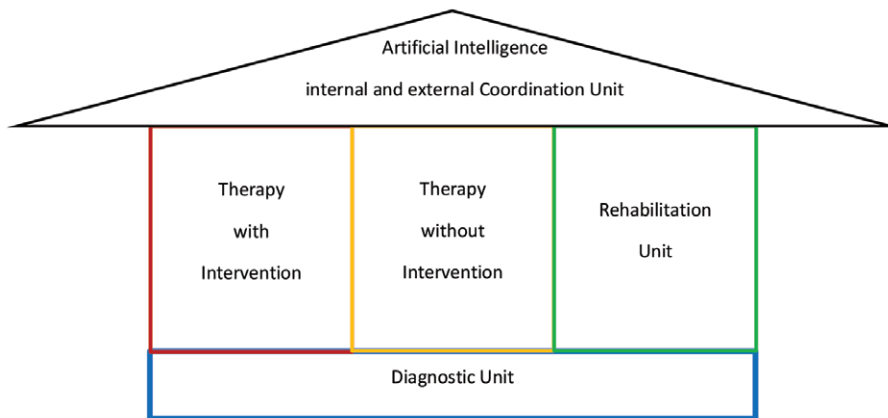


Figure 1. Schedule of artificial intelligence managed hospital

help but the system is not stimulation the institutions and the medical staff to put some more attention on this group of patients with low paid DRG diagnosis. On the other hand, using the pure hospital completion as a model for healthcare we are moving into the revenue-oriented system. This leads to a lot of deviations, which are already observed by therapies which do not improving the health, but could be calculated by the DRG system. Healthcare today is very complex and its importance will grow for the population in the future. Long-term improvement will be achieved using some new AI technologies. Before that, we should start with the medical education where ethical behaviour and emotional intelligence should be a big part of the recruitment process of medical students. Collective intelligence should be used to develop trends and make complex decisions. The big data analysis will be in the future to build the background of each political decision, healthcare included. Artificial intelligence will be indispensable, especially in areas of clashing group interests and potential conflict situations. The developments in AI will increase productivity and efficiency of care, allow the practitioners and nurses to spend more time in direct care by patients. In consequence, it will introduce faster delivery of help and accelerating diagnostic time and optimize to allocating resources. Let's analyze several interesting points like hospital structure, management, logistics, and employees.

EXPECTED CHANGES IN HOSPITAL STRUCTURE

Our considerations of the future hospitals and their permanent structures are evolving with time. Two trends will influence its cultural. First work-life balance and secondly the general trend to eradicate the feudal relations. This process will accelerate especially now after the pandemic situation which

was pushing us strongly into virtual reality. The future brings hospitals with more flexibly (Fig.1.) and focuses on efficiency according to resources (personal, equipment, and infrastructure). The huge influence will come through the machine learning (ML) and Big Data analysis – which already exists. The physical division into specialist departments will not be necessary. The beds will be flexible. Every single place will be able to change its belonging or function according to the temporary needs of patients. The gold era of coordinators will come. How it should be functioning? Some colleagues think that the coordination will in the future not come from personal human interactions. Why? Everybody who worked in the hospital knows that we have to deal with the “human nature” which supposes to be flexible, gentle, and solution-oriented. This is the ideal imagination but mostly it is confronted with conflict of interests and daily competition for resources. The situation produces stress by both sides the coordinator himself and of course the therapeutic teams who have to deal with the suffering patient.

The Surgisphere Corporation in Chicago, USA records and analyses all patient's admission in several hospitals thought out the USA. The data are clustered with the machine-learning program. First results showing prediction of involved resources including the specialty, councils, need of diagnostics, OR, ICU, and length of stay. Alone this simple information allows simplifying hospital coordination and optimizing the use resources. The transparency presented by Time Table Tools (already existing in progressive emergency rooms) allows us to decrease the stress within the small units responsible for the patient tasks. The communication and workflow is integrated into Smartphones or Tablets. In the future, the patient will receive individual personal sensors which follow continuously the vital parameters and localization of the patient (technically several

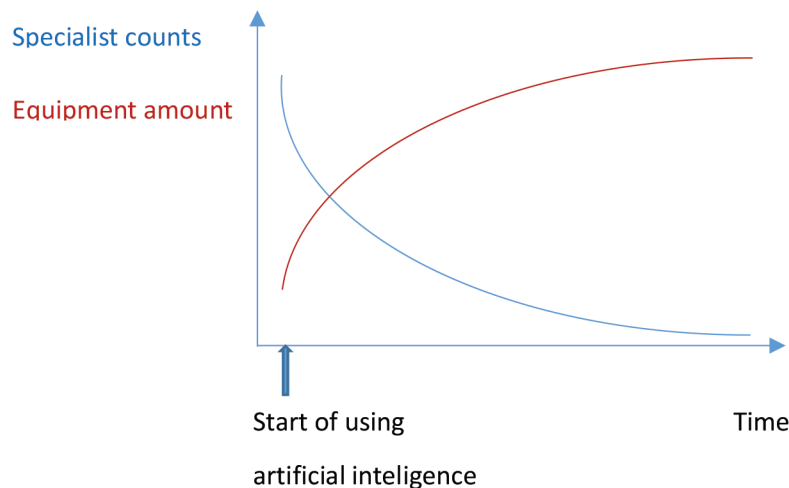


Figure 2. Development of the amount of equipment and specialist in healthcare

systems already existing). The whole process will be controlled similar to the industrial processing of Air Traffic Control by the software and human coordinators/ controllers. Each Hospital Unit will receive one or more coordinators/ controllers. With this industrialised workflow the hospital of the future will be more efficient, faster and saver.

■ MANAGEMENT AND LOGISTICS

In the age of ground income considerations, the idea to stop thinking about the Hospital system like the average business is important. Why? First, from the economical point of view, we are dealing with country healthcare budgets collected directly or separated from taxpayer money, hence the Healthcare systems are always funded from public money. Competition and industrialization in the healthcare sector will have one result - continuous growth of costs and growing counts of patients and overtreatment. Paying for performance or a flat rate per case showed not to be the best option to finance the healthcare system. By using machine learning and AI three major developments will arise: Standardization of bed counts per 100000 residents, Hospital profiles optimization and change of employment structures. All these changes will be a direct consequence of the analysis of already existing data by artificial intelligence followed by rationalization and use of robots, engines, or software. All parts of the hospital's systems will change from staff, through supply to infrastructure. Two aspects will completely surprise us: first management change which will be reduced and replaced by artificial intelligence, and its sustainable human part completely politicized, second logistics and contracting will be based on AI analysis of appearing medical innovations on the market and hospital waste.

■ EVOLUTION BY HOSPITAL STAFF

The hospital employment change is already here. Currently, there is a growth in the IT area, as well as in the technical supporting staff. This shows a present evidence of the technological progress in medicine. Analysing the cybernetic progress these changes will influence all hospital employees. We already mentioned management programs. Furthermore the development of Natural Language Processing (NLP) will have a big impact by recognizing the emotional state of a person who is undergoing its analysis. The first known software of this kind was the "Cogito". Nowadays, its variations are used regularly in companies to identify customers interested in buying products. The application of this system to health care will lead to standardization of communication and reduction of employment in call centres and emergency wards of hospitals. Another example is Amelia a cognitive virtual agent platform from IPSoft, demonstrates learning abilities and elements of emotional intelligence. It can perform autonomic task management using conversational AI and manage some operational and administrative hospital processes. Amelia can play the role of a care protocol "whisper agent" (e.g., reminding practitioners of steps that need to be followed), as well as a care operations agent, helping document a patient visit, admitting patients, retrieving medical history prior to a conversation, checking availability of hospital beds, retrieving lab results and scheduling specialist appointments. The Amelia Health agents, enabled by AI technology, learn continuously with every completed task and can communicate through voice, mobile, web, and chat. The program needs some adaptations but will shortly allow almost everyone to have cyber office management. We observe the development of cleaning or transport robots, these

developments will lead to employee reduction in hospitals. Furthermore, there are Robots that distributes medication or food to patients on a normal ward. This will lead, to the reduction of nursing staff. There will be no exceptions with doctors. There will be five steps of the employment amendments by medical specializations (Fig. 2.). First, there will be a reduction in all specializations that are dealing with static images. There are programs like DeepMind (a UK-based AI company owned by Google) which can describe the radiologic diagnosis and is even better than a human specialist. The same will happen in pathology and dermatology. The next step will appear by all specializations which are dealing with medical algorithms based on reproducible standardized examinations like cardiology, diabetology, oncology, neurology, endocrinology, etc. The alteration will not come from the medical societies but more likely from the internet itself. Insurance companies will prefer AI-based diagnostic for its efficiency and lower costs. With autonomic mobility in the rise, autonomic invasive diagnostic and treatment will become the standard tool. The modifications will allow us to perform robotic punctions, endoscopic robotic intraluminal treatments, robotic tooth treatment and further more. The fourth steep will be a combination of technological tracking accuracy and operational safety. We do not know if operations

will be obsolete in 30 years. Maybe biologic, nano- and picotechnology will solve the problem. The last step will be psychiatry. Here the molecular biology will allow us to transfer the mind in an artificial environment.

■ CONCLUSION

Healthcare is one of the major success stories of our times. Medical science has improved rapidly, raising life expectancy around the world, but as longevity increases, healthcare systems face growing demand for their services, rising costs and a workforce that is struggling to meet the needs of its patients. Demand is driven by a combination of unstoppable forces: population aging, changing patient expectations, a shift in lifestyle choices, and the never-ending cycle of innovation being but a few. Of these, the implications from an aging population stand out. By 2050, one in four people in Europe and North America will be over the age of 65—this means the health systems will have to deal with more patients with complex needs. Managing such patients is expensive and requires systems to shift from an episodic care-based philosophy to one that is much more proactive and focused on long-term care management. Building on automation, artificial intelligence has the potential to revolutionize healthcare and help address some of the challenges set out above.

KONFERENCJE Roboty Medyczne 2020
WSPIERA FINANSOWO
URZĄD MARSZAŁKOWSKI WOJEWÓDZTWA ŚLĄSKIEGO
Dziękujemy!



Województwo
Śląskie

Smart operating room and surgery driven by artificial intelligence

Artykuł recenzowany

ALEXANDER FRANK¹
W. KONRAD KARCZ²

¹ Dr. med. Alexander Frank
Clinic for General,
Visceral and Transplant Surgery
Hospital of the LMU Munich
- Campus Großhadern
Marchioninistrasse 15 - D-81377 Munich
Phone +49 89 4400 0
alexander.frank@med.uni-muenchen.de

² Prof. Dr. med. Dr. h.c. mult.
W. Konrad Karcz PHM
Head of Division Minimally Invasive Surgery
Clinic for General,
Visceral and Transplant Surgery
Hospital of the LMU Munich
- Campus Großhadern
Marchioninistrasse 15 - D-81377 Munich
Phone +49 89 4400 73560
konrad.karcz@med.uni-muenchen.de

Abstract

From a surgical point of view, artificial intelligence (AI) does seem to be the holy grail of future medicine. Today data driven medicine influence also handwork - done with knives, scissors, needles and sutures. Should a surgeon learn something about AI and data science? Big data, machine learning, NLP, video analysis and robotics will be a big part of modern surgery. Today's operating robots like the Davinci already works with video analysis and machine learning. How AI will influence the OR of the future will be shown in this story. Please meet Dr. Smith. The surged of the future!

Słowa kluczowe:

sztuczna inteligencja, zarządzanie szpitalem,
zarządzanie oddziałem chirurgicznym,
sala operacyjna

Keywords:

artificial intelligence, hospital management,
management of the surgical department,
operating room

INTRODUCTION

To open some more minds about AI, we want to show a different perspective and introduce some thoughts about the future operation theatre and surgical patient management. Therefore, let us introduce Dr. Peter Smith, a general and visceral surgeon in our future hospital. During ward run in the morning, he notices that his patient is already on the way to the operating room. After a short time, Dr. Smith's smartphone is vibrating. He is called to come to the OR, his patient is ready for surgery. In between, he checks all significant lab values, images and medical information about the patient on his mobile device prepared by new Hospital-AI-Software. Arriving the operation theatre, Dr. Smith is automatically recognized as the primary surgeon by FCS (face recognition system). Entering the room he is introduced with the words: "Good morning Dr. Peter Smith, the

patient Anna Hanson is ready for the cholecystectomy. The personal patient identification is completed, all instruments ready, navigation online, devices checked, the whole team is ready to start." Dr. Peter Smith is concluding "Thank you, Team-Time-Out complete, operation will start:" As the operation goes on, a voice appears with the question, whether the next patient can be called for transportation to the operating room. Dr. Smith confirms this recommendation. After finishing, Dr. Smith heads to the documentation area. After entering to a computer terminal, all significant information about the operation is already documented. He just has to check the data and answered the questions according eventual irregularities. All information is automatically stored in a database. At that time, the patient after cholecystectomy is already on his way to the recovery unit and the next patient is clear for operation.

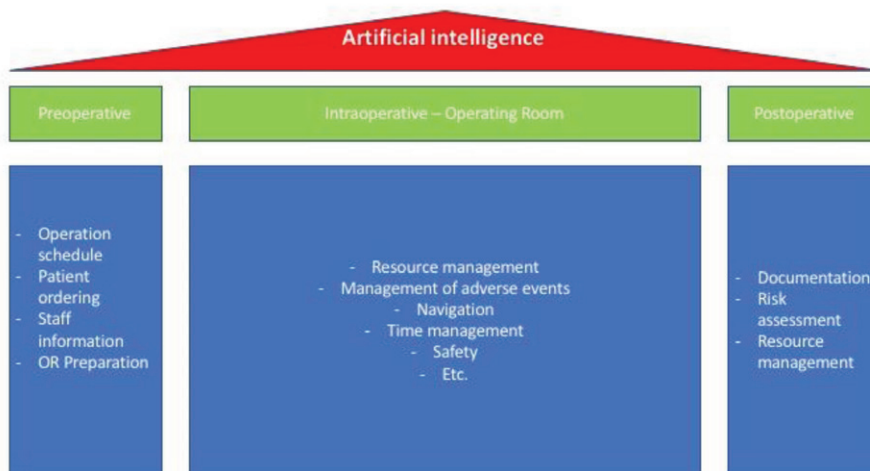


Figure 1. Artificial intelligence in perioperative setting

Now, the question is: Where is the place of AI in this scenario? We would like to present our imagination about AI in a peri-, intra- and postoperative setting (Figure 1) dealing with these major topics: time and resource management, workflow, safety, documentation data collection and prediction.

■ TIME AND RESOURCE MANAGEMENT

In our daily work, operating room schedule is set by preoperative study of images and medical information of the patients. And of course, by the experience of the planning surgeon. This often leads to the fact that planned procedures have to be shifted to the next day due to unexpected events or misplanning, with consequences with discomfort of patients and additional costs for the hospital. Dr. Smith's experience will be different. His patient was already on his way to the operating room. An AI, which knows diagnosis, planned procedure, medical data, number of staff for the day, surgeon and other information, planned the schedule, even the transport was organised and performed by robots. Based on this data, time and length of the operation is already predicted and the operation theatre is optimal selected, so that there is no delay and interference with other operations. Like in modern automotive industry, where all parts are delivered to the production line "just in time", patient, nurses, anesthesiologist and instruments are called to proceed to their dedicated places. And of course, the workflow of our Dr. Smith is managed. He is called via smartphone, where all information about the patient and the time schedule are listed. Dr. Smith confirms the call and heads to his operation.

After a while, the smart operating room asks Dr. Smith for confirmation if the next patient can be ordered. If he confirms the recommendation the next patient will be on his way. In case Dr. Smith does not

confirm the next available surgeon will be called to overtake the responsibility and "keep the workflow going".

This is possible because significant steps of the operation are captured by the AI and the end of the operation can be predicted. The system consists of many robots, engines, sensors and cameras who are cooperating with each other and will be able to optimize and improve the process itself in the future. So the next patient is chosen automatically based by diagnosis, planned operation, team, next free theatre, etc. On the end the time and resources are optimally used.

■ SAFETY

During the evolution of surgery and surgical devices, patient's safety plays a major role of development of procedures as well as hospital structures. After implementation of "Surgery Safety Checklists" by WHO and Team-Time-Outs before starting surgery, patient's safety was increased and the number of mistaken patient identity was decreased dramatically (Renner et al., Deutsch Arztebl 2012; 109(20): A 1016–8). As you remember our Dr. Smith enters the OR, was welcomed with his name, the procedure he is going to perform and of course the patient's name. This is because the smart OR has recognized the patient by reading an individualized digital wristband. AI knows the diagnosis, the actual continuous vital parameters, actual location and the procedure planned for this patient even better as the surgeon. The latter is recognized by his smartphone and is confirmed by voice of face recognition system, automatically. By these facts, all identification data is double checked in addition to the Team-Time-Out.

All instruments and devices are delivered to the OR just in time. AI knows about the comorbidities of the patient and calculates the risk of adverse events.

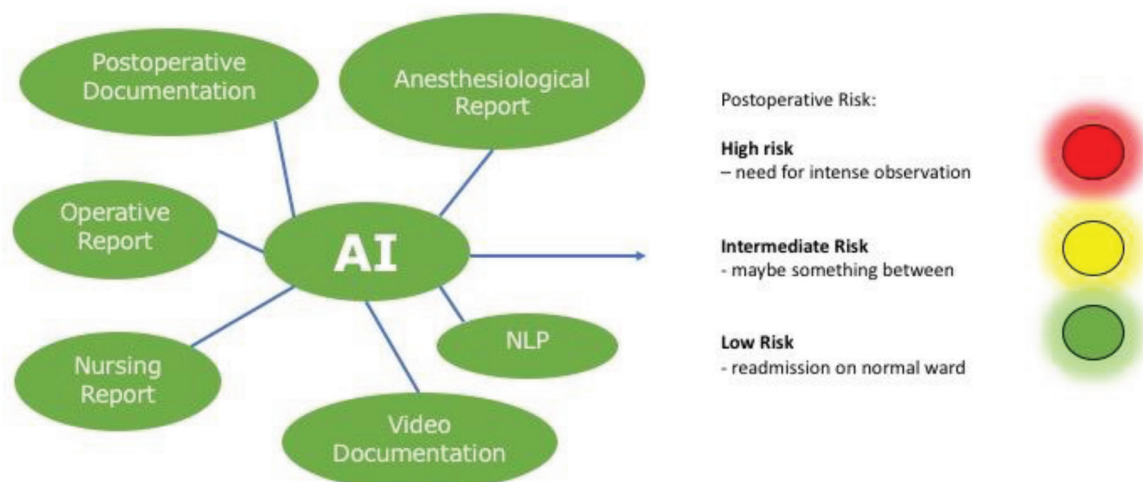


Figure 2. Different data assessed during operation and in the postoperative phase. This can be used for postoperative risk assessment

Based on this risk, AI has automatically provided additional monitoring devices, additional instruments and special anesthesiologic medication by the OR-Supply-Robot. If it is needed during the procedure, the whole team can draw on these things rapidly. During the laparoscopic cholecystectomy which is performed by Dr. Smith, a augmented reality visualization system enhances critical structures on the screen. Every step is observed by the AI. This machine learning based supervision detects adverse events. If for example a significant bleeding is detected, the surgeon is asked to confirm that everything is all right. If he does not react, an automatic call for the next free surgeon is sent to obtain help. This minimizes time to react on difficult events and decreases the risk of life-threatening conditions. After surgery, all data collected during the operation, for example blood pressure, heart rate, ventilation parameters, lab values and given medication, accompanied by detection of adverse events, blood loss, etc. is stored and analysed by another machine learning. A risk-score is calculated to help distinguish that either an intensive care unit treatment, or an intermediate care bed is needed for the patient (Figure 2). In our case, everything is clear, double controlled and the patient can proceed via recovery room to normal ward. As we all know, intensive and intermediate care beds are rare. It should be mentioned that in this particular area we would find incredible potential for saving costs using AI. Generally the system will help to ensure that critical patients are triaged to the optimal level of care.

■ DOCUMENTATION:

Surgical documentation plays a crucial role. It is important for communication between health care professionals, planning future operations, research,

education and of course legal issues. Written documentation is often incomplete, especially after long procedures, or when documentation is done hours or days after the operation and always slow. AI can help thought automatically report and produce significant improved value.

After finishing the operation, Dr. Smith enters the a computer terminal. After recognition of Dr. Smith's smartphone all significant stored data of the past operation are shown on the screen. Crucial steps of the procedure are stored as short video clips. The AI previously selects different issues and the surgeon just have to pick the ones he needs. AI provides postoperative care planes according to analyzing comparable operations and the actual patient condition. Not only obvious information is stored. Additionally the number of towels, sutures, needles and the overall used equipment is analyzed. Furthermore, utilization time or used energy of coagulation device, other power ran equipment, used medication and the vital signs of the patient during operation influence a score, calculated by AI to distinguish postoperative level of care (as explained above). The documentation gains quality, simultaneously improves management and care.

■ DATA COLLECTION:

Surgery is producing a great amount of data. Generally, there are various data during an operation. Sometimes it is so obvious, that we see and hear it all day, but do not think of using it! For example, our verbal and non-verbal speech. Natural language processing helps detecting words and sentences. This can be analyzed and lead to special reactions. The word "bleeding" for example can activate a cascade of happenings such as call for further medical support and additional resources. Different devices

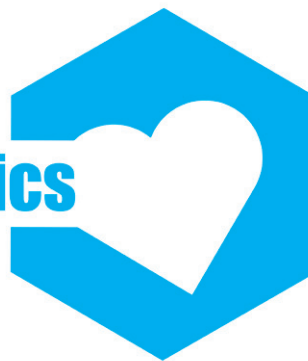
produce various noises. For example the “beep” of the coagulation device indicates its use. On the other hand noise level inside the operating room can denote stress. As in our example, time of procedure can help to plan and manage operation schedule. Vital signs, medication, ventilation parameters and blood loss can be used for calculating risk scores. All consumable material can indicate any adverse events occurred during operation, but is not analyzed in real time nowadays. Imagine videos in HD or 4K of all operations during the day. The amount of data the surgical OR could producing per day is not comparable with any other medical profession. The Big Data is there - We just have to use it.

■ CONCLUSION:

Artificial intelligence is probably one of the most interesting area of science, today. It changes our daily life although we often do not even recognize it. Therefore, Data and data science is one of the most promising fields in modern medicine. Subfields such as pathology, radiology and dermatology already use machine learning based tools for diagnostics. Nowadays, Electrocardiograms are analyzed in real-time. The question is, how can artificial intelligence influence and improve a surgeon’s life? As we showed in our example with Dr. Smith, there are several points of AI’s contacts in a surgeons daily work. Big Data and AI will highly influence the decision making and can help by real-time data analysing in the future. OR data is generated continuously, but we have to make this data usable. Future medicine is AI based medicine!

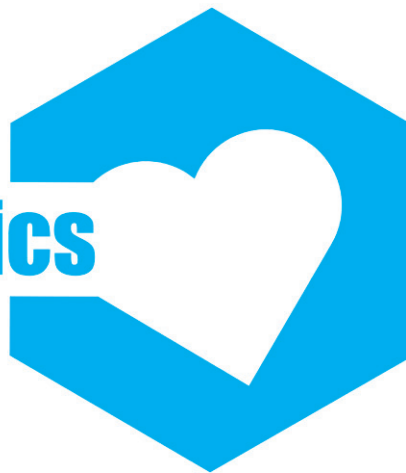
www.medicalrobots.eu

International Society
for **Medical Robotics**



www.medicalroboticsreports.eu

International Society *for* Medical Robotics



Invitation

You are cordially invited to join the International Association for Medical Robotics / International Society for Medical Robotics ISMR. Currently we are the Witnesses of the expansion of medical robotics into medicine areas. Unlike industrial robots, medical robots operate directly in the human being environment of and on behalf of Him. It's a fascinating area of research and often create a need to introduce a completely new design and technological solutions. Robots are a chance to introduce new standards of service and medical care, and are the only solution to problems related to general support of the old or disable patients in the future. It depends on us how fast will the development of this important field, and how accurate will the decisions related to it. Feel free to work actively in the Association! The Association is a voluntary, self-governing, a permanent association of science and technology, bringing together members whose professional activities or interests related to the medical robotics.

So – this is OUR ASSOCIATION!

President
Zbigniew Nawrat

Ladies and Gentlemen,

All interested in joining the International Association for Medical Robotics and support its statutory activities we invite you to submit personally or send by mail a signed declaration by the membership. At the same time, please refer to the Statute.

Zaproszenie

Serdecznie zapraszam do przystąpienia do Międzynarodowego Stowarzyszenia na rzecz Robotyki Medycznej / International Society for Medical Robotics ISMR. Jesteśmy świadkami ekspansji robotyki na obszar medycyny. W odróżnieniu od robotów przemysłowych roboty medyczne działają w bezpośrednim oddziaływaniu i na rzecz człowieka. To fascynujący obszar badań naukowych i często potrzeba wprowadzenia zupełnie nowych rozwiązań konstrukcyjnych i technologicznych. Roboty stanowią szansę na wprowadzenie nowych standardów usług i opieki medycznej, są jedynym rozwiązaniem problemów związanych powszechną obsługą osób niepełnych. To od nas zależy jak szybki będzie rozwój tej ważnej dziedziny i jak trafne będą podejmowane decyzje z jej rozwojem związane. Zapraszam do aktywnej pracy w Stowarzyszeniu! Stowarzyszenie jest dobrowolnym, samorządnym, trwałym zrzeszeniem o charakterze naukowo-technicznym, skupiającym członków, których działalność zawodowa lub zainteresowania wiążą się z robotyką medyczną.

Czyli – to NASZE STOWARZYSZENIE!

Zbigniew Nawrat
Prezydent

Szanowni Państwo,

Zapraszamy wszystkich zainteresowanych przyłączeniem się do Międzynarodowego Stowarzyszenia na rzecz Robotyki Medycznej i wspieraniem działalności statutowej do złożenia osobiście lub drogą pocztową podpisanej deklaracji członkostwa.

www.medicalrobots.eu



**SZPITAL
NA KLINACH**
Grupa Neo Hospital

**NAJBLIŻEJ
PACJENTÓW**



Centrum Chirurgii Robotycznej

Jako jedyni w południowo-wschodniej Polsce, zapewniamy pacjentom dostęp do najnowszych światowych technologii. Szpital dysponuje najnowszą generacją, autoryzowanym systemem wsparcia chirurgicznego da Vinci.

UROLOGIA

- prostatektomia radykalna
- resekcja nerki

GINEKOLOGIA

- histerektomia
- całkowita mezometrialna resekcja szyjki macicy

CHIRURGIA OGÓLNA

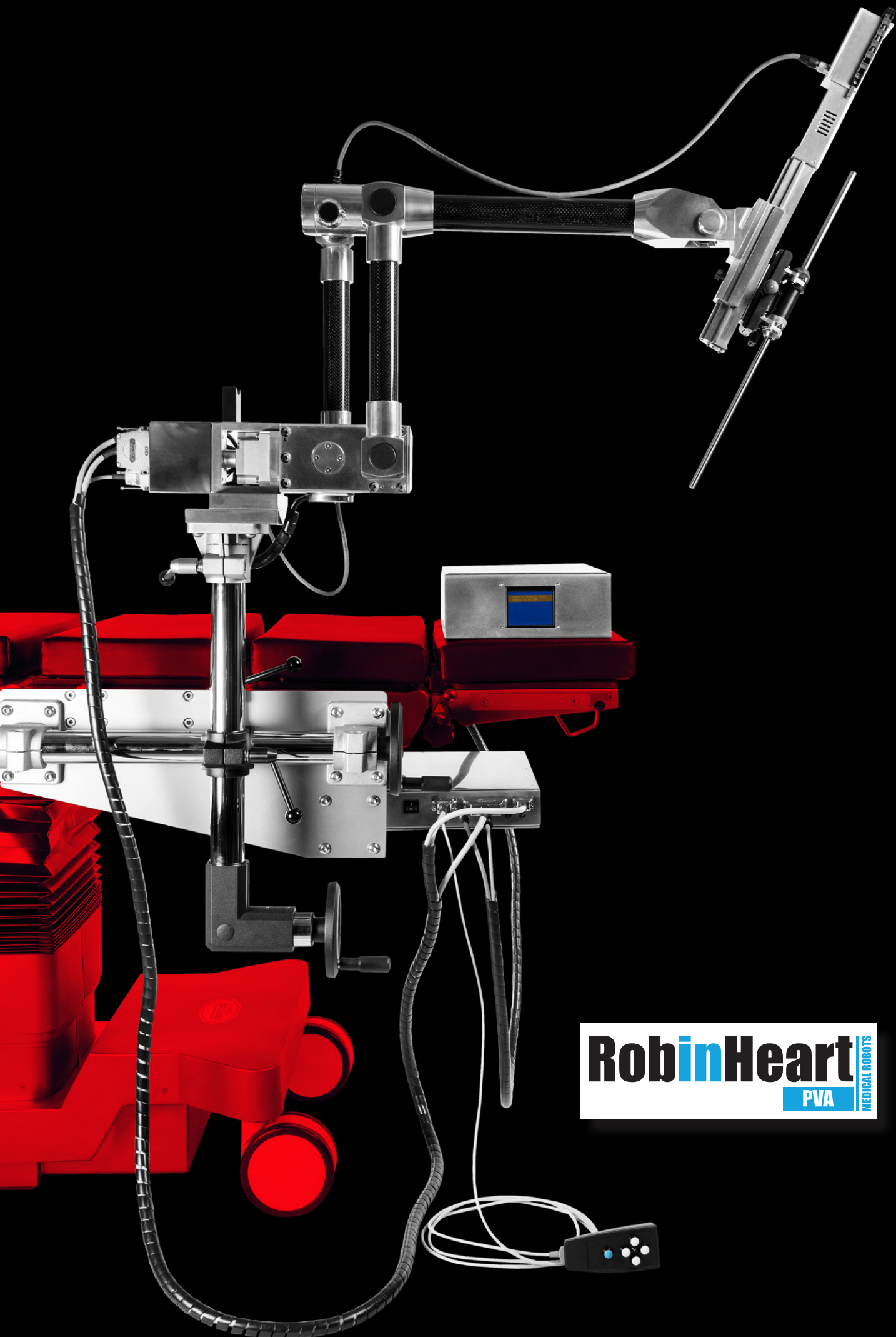
- operacje przepuklin rozworu przełykowego
- operacje dużych przepuklin brzusznych
- operacje przepuklin pachwinowych
- zabiegi bariatryczne
- operacje pęcherzyka żółciowego
- obwodowa resekcja trzustki

Jesteś lekarzem, interesujesz się nowymi technologiami, chciałbyś dołączyć do naszego zespołu - skontaktuj się z nami

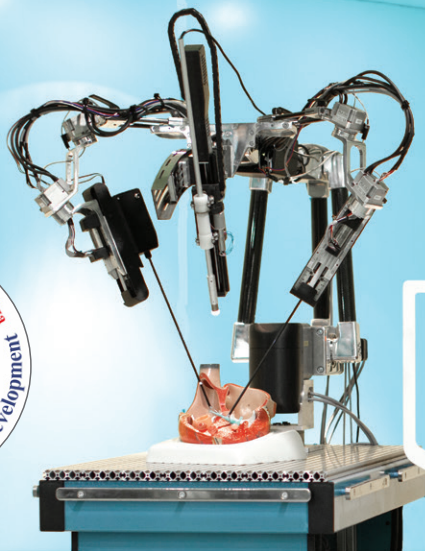
☎ +48 785 051 411 ✉ biuro@neohospital.pl

🏠 Szpital na Klinach, ul. Kostrzewskiego 47, Kraków

www.szpitalnaklinach.pl | www.zabiegidavinci.pl



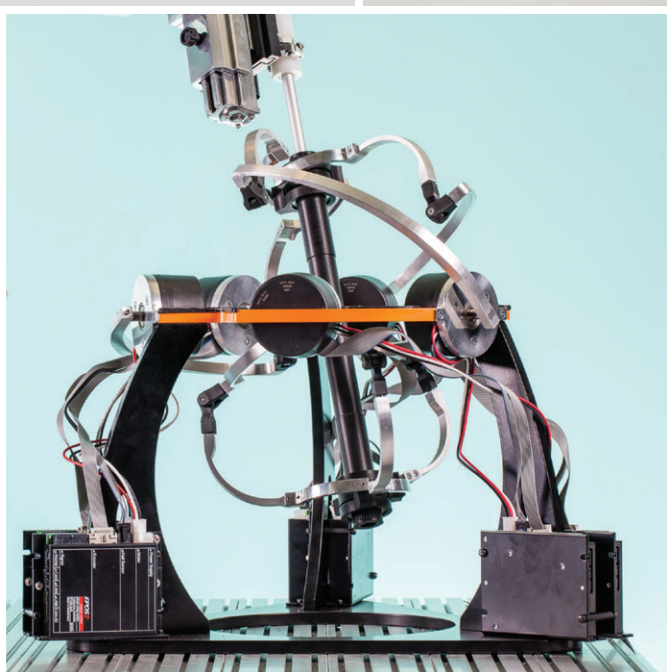
RobinHeart
PVA
MEDICAL ROBOTS



Robin
Stiff Flop
Console

RobinHeart

TELE MEDICAL ROBOTS





Lubimy roboty. Z wzajemnością

Specjalizujemy się w dostarczaniu zaawansowanych rozwiązań dla medycyny, a nasza oferta w obszarze robotyki medycznej stale rośnie.

W portfolio Synektik znajdują się m.in.:

- systemy chirurgiczne Da Vinci,
- systemy robotyczne dla farmacji onkologicznej APOTECaChemo,
- roboty do dekontaminacji pomieszczeń.

Obserwuj nasze rozwiązania na: **www.synektik.pl**

