

# Nowoczesne osiągnięcia robotyki i cybernetyki we współczesnej diagnostyce medycznej

Artykuł recenzowany

**DOMINIKA ADAMCZYK<sup>1</sup>**  
**JACEK JANKOWSKI<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Wielospecjalistyczny Powiatowy Szpital im. S.A. im. B. Hagera w Tarnowskich Górach

<sup>2</sup>Szkoła Doktorska Śląskiego Uniwersytetu Medycznego w Katowicach

**Słowa kluczowe:**

*Słowa kluczowe: roboty medyczne, roboty diagnostyczne, diagnostyka medyczna*

**Keywords:**

*medical robots, diagnostic robots, medical diagnostics*

## Streszczenie

*W artykule opisano zastosowanie nowoczesnych technologii takich jak robotyka i cybernetyka w wybranych metodach diagnostyki medycznej – zarówno już obecnie funkcjonujących jak i będących dopiero w sferze badań. Przedstawiono w skrócie zasadę działania urządzeń diagnostycznych oraz przytoczono najnowsze osiągnięcia techniki w dziedzinie wymienionych metod. Większa moc obliczeniowa maszyn, wyższa rozdzielczość uzyskiwanych obrazów, automatyzacja i wykorzystanie sztucznej inteligencji oraz integracja sprzętu z ludzkim ciałem – te wszystkie czynniki mają na celu uzyskanie najdokładniejszej, najtrafniejszej i najszybszej diagnozy. Diagnoza jest natomiast kluczem do sukcesu terapeutycznego.*

## Abstract

*The article describes the use of modern technologies such as robotics and cybernetics in selected methods of medical diagnostics – those already functioning presently as well as still being in the field of research. The functional principles of diagnostic devices were briefly presented, and then authors focused on the latest technological achievements in the field of the above-mentioned methods. Greater computing power of machines, higher resolution of obtained images, automation and use of artificial intelligence, integration of equipment with the human body - all these factors aim to obtain the most accurate, exact and fastest diagnosis. After all, diagnosis is the key to therapeutic success.*

## ■ WPROWADZENIE

W leczeniu chorób najważniejszym czynnikiem jest szybkość, pewność i dokładność diagnozy – kiedy wiadomo, z jakim schorzeniem się ma do czynienia, można w krótkim czasie wdrożyć najlepsze dostępne leczenie. To maksymalizuje szanse na powodzenie terapii. Z pomocą diagnostom i lekarzom przychodzi cybernetyka, elektronika i robotyka. Udział tych dziedzin nauki we współczesnej diagnostyce jest większy niż można by się było spodziewać.

Cybernetyka jest nauką o sterowaniu oraz przesyłaniu i przetwarzaniu informacji w systemach technicznych, biologicznych i społecznych [1], zatem opiera się na niej cała diagnostyka obrazowa. Natomiast robotyka to nauka o maszynach przeznaczonych do wspomaganie lub realizacji czynności energetyczno-ruchowych, sensualnych i intelektualnych człowieka [2]. Najszerzej to każdy program komputerowy kontrolowany przez człowieka lub sztuczną inteligencję, który automatyzuje i przyspiesza wykonywanie pewnych zadań. Na tych programach i systemach przetwarzania informacji opierają się zarówno te dobrze nam znane techniki diagnostyczne, jak tomografia komputerowa, rezonans magnetyczny, czy ultrasonografia, a także te będące zwiastunami przyszłości – wszelkie urządzenia typu „wearable”, sensory czy też kapsułki endoskopowe. Artykuł przybliży najnowocześniejsze zastosowania tych technologii w wybranych metodach badania czy też obrazowania ciała ludzkiego.

## ■ TOMOGRAFIA KOMPUTEROWA

Tomografia komputerowa to badanie obrazowe z użyciem promieniowania X (promieniowania rentgenowskiego). Obraz powstaje na podstawie danych o osłabieniu promieniowania pod wpływem przejścia przez organizm człowieka. Promieniowanie to jest w różnym stopniu pochłaniane przez poszczególne elementy budujące ciało ludzkie. Dane są zbierane przez układ naprzeciwległe położonych detektorów i lampy rentgenowskiej [3].

## HISTORIA TOMOGRAFII KOMPUTEROWEJ

Technologia tomografii komputerowej została wynaleziona przez brytyjskiego inżyniera Godfreya Hounsfielda i amerykańskiego fizyka Allana Cormacka pod koniec lat 60. Pierwszy na świecie skan został uzyskany w 1971 roku za pomocą tomografu służącego do skanowania jedynie głowy – był to skan kobiety cierpiącej z powodu guza mózgu [4]. Pierwszy skan całego ciała za pomocą tomografii komputerowej został przeprowadzony przez amerykańskiego profesora biofizyki, fizjologii i radiologii Roberta Ledleya w 1973 roku [5].

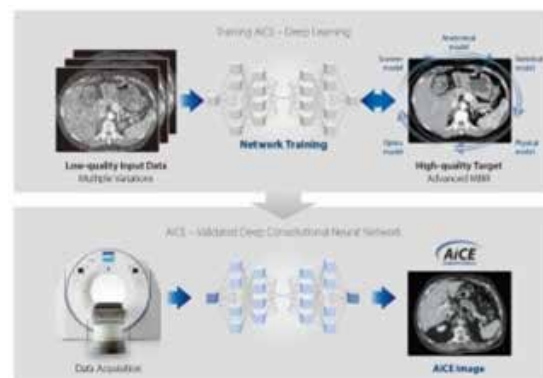
Przez lata technologia tomografii komputerowej rozwijała się – największy przełom nastąpił w latach 90-tych XX wieku, gdy wynaleziono spiralną tomo-



*Rysunek 1. Godfrey Hounsfield z pierwszym komercyjnym tomografem komputerowym*  
[https://www.amberusa.com/blog/remembering-sir-godfrey-hounsfield-inventor-ctscanner/?fbclid=IwAR21GE459Gw-OmvTLUPljfmQjx3LyYgOuFrYKJaTlkCTxkOy34tbHeB\\_u3RI](https://www.amberusa.com/blog/remembering-sir-godfrey-hounsfield-inventor-ctscanner/?fbclid=IwAR21GE459Gw-OmvTLUPljfmQjx3LyYgOuFrYKJaTlkCTxkOy34tbHeB_u3RI)



*Rysunek 2. Prototyp tomografu komputerowego*  
<https://mdct.net/mdct-net-10-years/10-facts-you-may-not-know-about-godfreyhounsfield-and-the-early-days-of-ct/?fbclid=IwAR3P3n0oTU2754BPm9KjRXfA2c5qLVHF9T2I3xtQ6EEImOtXZJho8SvKBM>



*Rysunek 3. Grafika obrazująca proces uczenia się sieci neuronowych mający na celu doskonalenie się sieci w technice poprawiania jakości obrazu przez usuwanie zakłóceń*  
[https://global.medical.canon/publication/ct/2019WP\\_AiCE\\_Deep\\_Learning](https://global.medical.canon/publication/ct/2019WP_AiCE_Deep_Learning)

grafię. W odróżnieniu od pierwotnego trybu osiowego, poprzez który otrzymywano jedynie obrazy pojedynczych przekrojów, tryb spiralny zapewnia



**Rysunek 4.** Przenośny aparat USG Butterfly IQ, który składa się z głowicy USG podłączanej do telefonu komórkowego  
<https://www.ultrasoundtraining.co.uk/resources/news/should-you-buy-a-butterflyultrasound-machine/ny>



**Rysunek 5.** Rycina przedstawia elementy systemu ReMeDi po stronie lekarza i pacjenta  
<http://engineering.accrea.com/pl/projekt-remedi/>



**Rysunek 6.** Wykorzystanie systemu ADUM do badania USG gałki ocznej na pokładzie ISS  
[https://www.nasa.gov/mission\\_pages/station/research/benefits/ultrasound.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/benefits/ultrasound.html)

ciągłość badania i skrócenie jego czasu, gdyż w tym trybie jednocześnie stół tomografu wykonuje ruch w wymiarze przód-tył, natomiast lampa i detektory ruch obrotowy. Z początku technologia spiralna stosowana była w skanerach posiadających jeden rząd detektorów (tomografia jednorzędowa), następnie wprowadzono ją do urządzeń o większej ilości rzędów detektorów (tomografia wielorzędowa)[6].

## ■ TOMOGRAFIA KOMPUTEROWA DZIŚ ULTRA WYSOKA ROZDZIELCZOŚĆ

Jednymi z najnowocześniejszych osiągnięć technologii wśród tomografów komputerowych są produkty amerykańskiej firmy Canon Medical Systems – seria Aquilion. Sprzęt osiąga rozdzielczość rzędu nawet do 150 mikronów, inaczej 50 lp/cm (50 linii naprzemiennie białych i czarnych w 1 cm) przy porównywalnej ze standardowym TK dawce promieniowania (różnica wynosi jedynie 0,6 mGy) [7].

## SZTUCZNA INTELIGENCJA

System AiCE (Advanced Intelligent Clear-IQ Engine): Technologia oparta na systemie sieci neuronowych, który wykorzystuje technikę głębokiego uczenia się – sieci te są trenowane do jednego zadania – rekonstrukcji obrazów, które są wyostrome, pozbawione zakłóceń, o teksturze jak najbardziej zbliżonej do naturalnej [7].

Wykorzystanie sztucznej inteligencji do rozpoznania choroby COVID-19 w obrazach TK klatki piersiowej: W październiku 2020 w czasopiśmie „The Lancet” opublikowano wyniki badań Minghuan Wang i zespołu, które polegały na określeniu przydatności specjalnego programu opartego na sztucznej inteligencji w rozpoznawaniu na podstawie obrazów TK klatki piersiowej choroby COVID-19. W badaniach wzięło udział 2447 osób przyjętych między 1 lutego a 3 marca 2020 do Tongji Hospital, w chińskiej prowincji Wuhan, najbardziej dotkniętej wówczas epidemią SARS-CoV-2. Wśród pacjentów było 1647 z pozytywnym testem RT-PCR w kierunku SARS-CoV-2 oraz 800 z negatywnym. Dla współczynnika ufności 0,05 osiągnięto czułość 0,923, swoistość 0,851, wartość predykcyjna dodatnia wyniosła 0,790, a wartość predykcyjna negatywna 0,948. Określenie pozytywnego wyniku zabierało programowi średnio 00:55 minuty, natomiast radiologowi 23:06 minut do wydania raportu o pozytywnym wyniku. Współczynnik rzetelności Kappa Cohena (obrazujący zgodność między programem a radiologami) był również wysoki – na poziomie 0,839. Wniosek z badań jest taki, że program sztucznej inteligencji rozpoznawał na podstawie obrazów TK chorobę COVID-19 z bardzo dużą skutecznością i nieomylnością, porównywalnie do radiologów, ale do tego średnio 42 razy szybciej [8]. Wykorzystanie programu przyspieszyłoby wykrywanie zakażeń, co

zwłaszcza na wczesnym stadium choroby jest bardzo ważne – szybkie wykrycie zakażonych pozwala na lepszą kontrolę nad transmisją choroby, ograniczeniem jej, a w konsekwencji ma na celu odciążenie placówek medycznych i szpitali, co jest podstawą w walce z pandemią.

#### DYNAMICZNA TOMOGRAFIA KOMPUTEROWA 4D

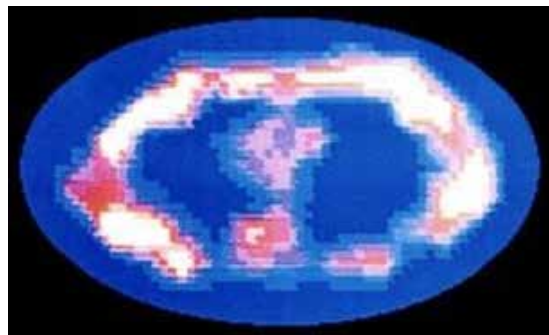
Czterowymiarowa tomografia umożliwia wykonywanie dynamicznego czy też funkcjonalnego badania. W przeciwieństwie do konwencjonalnej tomografii komputerowej, gdzie badana część ciała musi pozostać w bezruchu, w TK 4D możliwe jest przeskanowanie obszaru ciała w trakcie jego ruchu [9]. Przykładem przydatności badania może być sytuacja pacjenta, który odczuwa ból przy poruszaniu kończyny w stawie, natomiast konwencjonalne metody nie wykazały patologicznych zmian mogących odpowiadać za dolegliwości. Metoda pozwala zdiagnozować przyczynę np. bolesny skurcz mięśni bądź niestabilność stawu w trakcie ruchu.

#### ■ ULTRASONOGRAFIA (USG)

Ultrasonografia jest nowoczesną nieinwazyjną metodą obrazowania narządów wewnętrznych ciała ludzkiego. Obraz w czasie rzeczywistym powstaje poprzez wysyłanie fal akustycznych przez głowicę urządzenia USG, która podczas badania przylega do badanej okolicy ciała. Fale te są odbijane na granicy struktur o różnej impedancji akustycznej (płyn/tkanki, tkanki/kość itp.) a następnie odbierane przez głowicę. Na podstawie siły odbijania i czasu powrotu sygnału do głowicy utworzony zostaje obraz. Zakres stosowanych częstotliwości to od 2-50 MHz [10]. Głowice o wyższej częstotliwości uzyskują wyższą rozdzielczość obrazu, natomiast pozwalają obrazować głównie struktury położone płytko (np. tarczyca). Głowice o niższych częstotliwościach pozwalają na obrazowanie głęboko położonych narządów ciała (np. w jamie brzusznej), kosztem rozdzielczości obrazu.

#### HISTORIA ULTRASONOGRAFII

Początków technologii USG możemy szukać już na początku XIX wieku kiedy wynaleziono SONAR (Sound Navigation And Ranging). Przez blisko 100 lat naukowcy rozwijali technologię sonografii głównie z myślą o łodziach podwodnych w kontekście nawigacji, pomiaru odległości i głębokości w wodzie. W 1880 roku Pierre i Jacques Curie odkryli efekt piezoelektryczny w kryształach kwarcu – kryształy te są podstawą budowy głowicy ultrasonograficznej. Największy rozkwit ultrasonografii jako metody diagnostycznej w medycynie przypadła na lata 60-te XX wieku. Rok 1965 był rokiem produkcji pierwszego aparatu do USG w czasie rzeczywistym – produkt firmy Siemens pod nazwą VIDOSON [11].



Rysunek 7. Pierwszy skan MRI – przekrój klatki piersiowej asystenta Damadiana, którego uzyskanie zajęło 5 godzin <https://mri-q.com/who-invented-mri.html>



Rysunek 8. Raymond Damadian i jego dwóch asystentów przy prototypie rezonansu magnetycznego



Rysunek 9. Widok magnesu ISEULT z przodu po instalacji w Saclay, Francja <https://www.metrolab.com/gigantic-11-7-t-mri-magnet-iseult-a-discussion-with-lionelquettier/>

#### ULTRASONOGRAFIA DZIŚ

Ultrasonografia rozwija się wielokierunkowo. Możemy wyróżnić kilka trendów, w kierunku których podążają najnowocześniejsze sprzęty do USG:

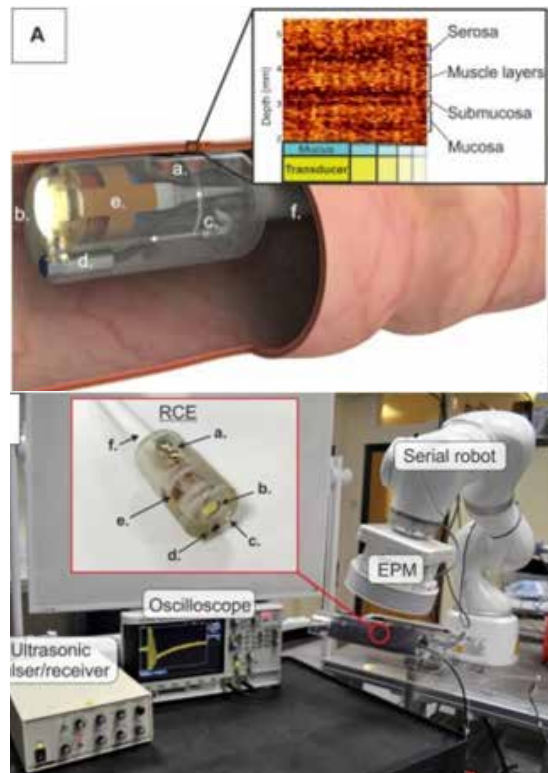
##### Uproszczenie i ułatwienie przebiegu badania:

Mniejsza masa urządzeń, mniejsza ilość przycisków na panelu obsługi, manipulatory kulowe zamiast ob-



Rysunek 10. Kapsułka PillCam

<https://www.dicardiology.com/article/capsule-endoscopy-systemsafety-patients-cardiovascular-implants>



Rysunek 11A. obrazuje ideę diagnostyki mikroUSG błony śluzowej jelita,

Rysunek 11B. przedstawia wszystkie kluczowe element system Sonopiil. (a)-głowica USG, (b)-lampa LED, (c)-kanał irygacyjny, (d)-kamera, (e)-system rozpoznający ustawienie kapsułki w czasie rzeczywistym, (f)-miękki, elastyczny przewód.  
<https://robotics.sciencemag.org/content/4/31/eaav772>

szerzej klawiatury, automatyczna optymalizacja obrazu przy pomocy ustawienia parametru zasięgu fal akustycznych, automatyczne rozpoznawania zmian strukturalnych w otaczających tkankach.

#### Integracja ultrasonografii ze sztuczną inteligencją:

Kwantyfikacja i wybieranie najlepszych do pomiaru danego parametru przekrojów (przydatne zwłaszcza w echokardiografii). Ułatwia to pracę zwłaszcza mniej doświadczonemu badającemu. W niektórych modelach ultrasonografów zastosowano technologię rozpoznawania głosu, dzięki czemu badający

może w jednej ręce trzymać głowicę, a drugą wykonywać zabieg np. nakłucie jamy opłucnej, a ustawienie urządzenia kontroluje komendami głosowymi.

#### Ultrasonografia 3D:

System wytwarza przestrzenny obraz badanej okolicy ciała, ułatwia np. chirurgowi zaplanować zabieg operacyjny, uwzględniając np. nietypowe warianty anatomiczne badanej okolicy ciała pacjenta lub kardiologowi interwencyjnemu lepiej ocenić strukturę mięśnia sercowego, naczyń wieńcowych czy też zastawki.

#### Nowa jakość obrazowania bardzo małych i/lub bardzo szybkich obiektów:

Jednym z najnowocześniejszych osiągnięć jest umożliwienie zbadania np. struktury serca bądź przepływu mózgowego płodu lub przepływu krwi w naczyniach włosowatych.

#### Point of Care Ultrasound (POCUS):

Coraz mniejsze, często rozmiaru tzw. „pocket-size” aparaty USG umożliwiające szybkie zbadanie pacjenta [12]. Taki sprzęt dałby wiele korzyści w różnych sytuacjach – przykładowo lekarz bada przyłożkowo pacjentów w całym szpitalu i ma przenośny lekki, mieszczący się w kieszeni sprzęt lub pacjent po wypadku wymaga natychmiastowej decyzji co do konieczności zabiegu operacyjnego. Wtedy przenośne urządzenie jest dużą pomocą. Urządzenie zwykle składa się z tabletu i podłączonej do niego głowicy. Są też warianty z możliwością podłączenia głowicy do telefonu komórkowego (Butterfly IQ) [13].

#### ULTRASONOGRAFIA NA ODLEGŁOŚĆ:

##### Projekt ReMeDi polskiej firmy ACCREA Engineering [14]:

Ze względu na zwiększony popyt na lekarzy specjalistów w naszym starzejącym się społeczeństwie powstał projekt mający zapewnić większy zasięg specjalistycznej opieki lekarskiej i lepszy do niej dostęp większej ilości pacjentów. W większości jednostek chorobowych najważniejsza jest szybko i sprawnie postawiona diagnoza, dlatego umożliwienie lekarzowi specjalście badania pacjentów na odległość ze stacjonarnego miejsca pracy byłoby doskonałym rozwiązaniem tego problemu. Projekt zakłada stworzenie systemu robotycznego, który umożliwi pełne zdalne badanie pacjenta przez lekarza specjalistę. Robot spełniałby funkcje: komunikację i kontakt wzrokowy lekarz-pacjent, zdalne badanie fizykalne zwłaszcza z uwzględnieniem badania jamy brzusznej oraz zdalne badanie ultrasonograficzne. System w założeniu składa się z:

Po stronie lekarza badającego – zdalny interfejs diagnostyczny (DiagUI): aktywne tory wizyjne z ekranami 3D, system telekonferencyjny, zaawansowane manipulatory sterownicze do obsługi ramienia

robota, aparatu i głowicy USG składające się m. in. z zadajnika haptycznego, pedałów obsługiwanych stopami, panelu dotykowego do obsługi aparatu USG i joystick'a. Kontroler haptyczny umożliwia odczuwanie oporu wywieranego przez ciało pacjenta oraz kontrolowanie siły nacisku głowicy czy ramienia robota.

Po stronie pacjenta – robot z ramieniem, głowicą USG, kamerami 3D, mikrofonami i wyświetlaczem do komunikacji z lekarzem, asystent ustawia robota i pacjenta wg poleceń lekarza, lekarz może także konsultować się z asystentem poza zasięgiem słuchu pacjenta.

Wszystkie funkcje systemu stworzone zostały tak, by maksymalnie urzeczywistnić kontakt bezpośredni lekarza z pacjentem – wizualizacja, czucie, mowa, informacje zwrotne dla lekarza podczas badania pacjenta – jego reakcje i emocje, opór i poczucie rzeczywistej palpacji. Połączenie wszystkich najnowocześniejszych technologii w tym jednym urządzeniu sprawia, że jest to projekt innowacyjny na skalę światową.

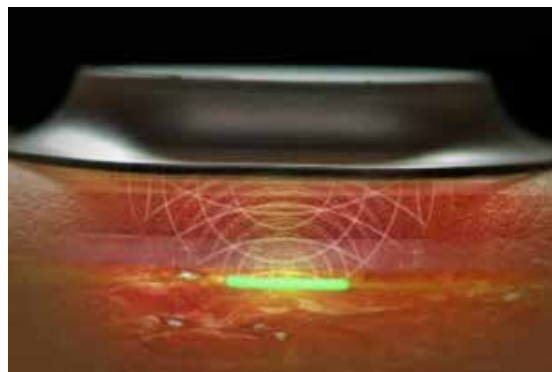
#### Ultrasonografia w kosmosie

Załoga Międzynarodowej Stacji Kosmicznej (ISS) w przypadku podejrzenia choroby lub urazu z wiadomych przyczyn nie może liczyć na bezpośredni kontakt z lekarzem z Ziemi, na pokładzie Stacji nie ma także miejsca dla stale dyżurującego lekarza.

Przeprowadzenie badania, postawienie diagnozy i propozycja leczenia – to wszystko musi odbywać się zdalnie. Z tego powodu NASA utworzyło system ADUM (The Advanced Diagnostic Ultrasound in Microgravity) [15]. Ten projekt pod przewodnictwem Scotta Dulchavsky, chirurga Henry Ford Hospital w Detroit ma na celu uczenie pracowników ISS przeprowadzania badań ultrasonograficznych na współpracownikach ze Stacji w celu wstępnego rozpoznania nieprawidłowości bądź umożliwienie wyspecjalizowanemu personelowi z Ziemi zdalnego dokonania takiej oceny na podstawie wykonanego badania w kosmosie. Dotychczasowe obserwacje wykazały, że ultrasonografia jest przydatną techniką diagnostyczną wielu przypadłości klinicznych, które mogą dotyczyć pracowników ISS nie tylko aktualnie przebywających w przestrzeni kosmicznej, ale również po powrocie na Ziemię. Astronauci narażeni są m.in. na: większą skłonność do zakrzepów, miażdżycy, zapalenia zatok, zaniki mięśniowo-kostne, urazy, ciała obce w gałce ocznej [16], a po powrocie na Ziemię może wystąpić większa tendencja do spadków ciśnienia tętniczego przy pionizacji tzw. hipotensja ortostatyczna [17].

#### REZONANS MAGNETYCZNY

Rezonans magnetyczny to rodzaj badania obrazowego, które pozwala na uzyskiwanie obrazów dowolnych przekrojów ciała człowieka. Metoda ta nie używa promieniowania jonizującego, natomiast wykorzystuje



Rysunek 12. Hydrożelowy mikrobiosensor oraz czujnik optyczny przymocowany do powierzchni skóry <https://profusa.com>



Rysunek 13. Hydrożelowy mikrobiosensor <https://profusa.com>

własności magnetyczne materii – głównie jąder wodoru wchodzących w skład cząsteczki wody znajdującej się w badanym obiekcie (części ciała pacjenta). Jądra pod wpływem pola magnetycznego ulegają uporządkowaniu zgodnie z Efektem Zeemana. Pod wpływem emitowanego pod kątem 90 stopni w stosunku do głównego wektora pola magnetycznego promieniowania o częstotliwości rezonansowej dla atomów wodoru jądra ulegają wzbudzeniu. Po zakończeniu wzbudzenia wektor magnetyzacji stopniowo wraca do stanu początkowego a jądro emituje fale radiowe odbierane przez aparat oraz przetwarzane na obraz badanych struktur. (Więcej nt. zasady działania MRI - Biofizyka, red. nauk. F. Jaroszyk [18]).

#### HISTORIA MRI

Pierwsze początki rezonansu magnetycznego możemy datować już nawet na rok 1938 kiedy to Isidor Issac Rabi w swoich badaniach odkrył, że wiązka molekularna podczas przechodzenia przez pole magnetyczne może emitować fale radiowe o określonych częstotliwościach. Rabi jako pierwszy użył określenia „magnetyczny rezonans jądrowy” [19].

To pierwsze odkrycie po rozszerzeniu badań przez innych naukowców doprowadziło do stworzenia nowej metody diagnostycznej ciała ludzkiego. W 1977 roku amerykańskim fizyk Raymond Damadian opublikował pierwszy skan ludzkiego ciała wykonany za pomocą MR. Był to skan przekroju klatki piersiowej jego asystenta [20]. Od tamtej pory rezonans magnetyczny zaczął pełnić rolę w diagnostyce medycznej.

### ■ REZONANS MAGNETYCZNY DZIŚ

Współcześnie w technice diagnostycznej, jaką jest rezonans magnetyczny nacisk kładzie się przede wszystkim na zwiększanie rozdzielczości poprzez budowanie większych magnesów o większej indukcji pola, ale duże znaczenie ma również wykorzystanie sztucznej inteligencji, a także zmniejszenie negatywnego wpływu na środowisko wskutek tworzenia magnesów ograniczających zużycie ciekłego helu do chłodzenia.

### ■ NAJSILNIEJSZE MAGNESY NA ŚWIECIE

Naukowcy z CMRR (Center for Magnetic Resonance Research) Uniwersytetu w Minnesocie przeprowadzili pierwsze badania z użyciem największego na świecie wykorzystywanego w klinice rezonansu magnetycznego. Współcześnie w powszechnym postępowaniu diagnostycznym wykorzystuje się aparaty o indukcji magnetycznej od 1,5-3 T.

Ciekawostką jest, że w Polsce, w Lublinie znajduje się rezonans magnetyczny o największej w Europie Wschodniej indukcji magnetycznej 7 T – wykorzystywany jedynie w celach naukowych – w niektórych krajach aparaty o podobnych własnościach już są dopuszczane do użytku klinicznego. Natomiast parametry rezonansu magnetycznego z Minnesoty są następujące [21]:

- Indukcja pola magnetycznego 10,5 T,
- łączna masa magnesu 110 ton (masa trzech samolotów Boeing 737),
- Apertura (średnica otworu do którego prowadzany jest pacjent) wynosi 88 cm,
- Tuba aparatu długości 400 cm.
- Żelazna osłona o wadze 600 ton,
- Samo zasilenie magnesu wymagało w przybliżeniu 40 tysięcy litrów ciekłego helu, a cały proces uruchamiania zajął 110 dni,
- Ostateczna instalacja całego sprzętu wraz z zasilonym magnesem trwała 5 dni.

Aparat został uruchomiony w 2014 roku, najpierw przez 4 lata prowadzono testy na zwierzętach. Po czterech latach w 2018 roku uzyskano pierwsze skany z udziałem ludzi [21]. Do dzisiaj pozostaje największym na świecie aparatem do rezonansu magnetycznego, który jest wykorzystywany klinicz-

nie do badań ludzi. Ośrodek w Minnesocie skupia się głównie na diagnostyce schorzeń ośrodkowego układu nerwowego, które są częstą przyczyną niepełnosprawności psychicznej jak i fizycznej [22].

Francuscy naukowcy z CEA IRFU (Institute for Research on the Fundamental Laws of the Universe) stworzyli magnes o indukcji magnetycznej 11,7 T i aperturze 90 cm. W ramach projektu ISEULT w lipcu 2019 został ukończony proces montażu i aktywacji magnesu na jednej z platform badawczych NeuroSpin ośrodka Frédéric Joliot Institute for Life Sciences w Saclay pod Paryżem [24]. Do tego procesu zużyto horrendalne ilości ciekłych gazów – 250 tysięcy litrów ciekłego azotu i 18,5 tysięcy litrów ciekłego helu [23]. Naukowcy mają nadzieję na uzyskanie rozdzielczości rzędu 0,1 mm (rozdzielczość „zwykłych” 3-T aparatów wynosi ok. 1 mm). Pierwsze skany planowano na przełom kwietnia-maja 2021 [23].

### ■ REZONANS MAGNETYCZNY Z OBSŁUGĄ BEZHELOWĄ

Jak widać wyżej, skanery rezonansu magnetycznego potrafią zużywać do aktywacji i chłodzenia bardzo duże ilości ciekłego helu. Klasyczne aparaty nie będą wymagały aż tak horrendalnych ilości jak największe magnesy na świecie (ISEULT czy magnes Uniwersytetu w Minnesocie), ale zwykle jest to ilość ok. 1500 litrów. Stanowi to wyzwanie finansowe jak i operacyjne. Firma Philips opracowała magnes BlueSeal, który zużywa 0,5% ilości ciekłego helu, który wymagany jest do działania konwencjonalnych aparatów. Wszystko dzięki uszczelnionej strukturze, która zapewnia zamknięty obieg cieczy, której fabrycznie umieszczana ilość wynosi zaledwie 7 litrów i zapewnia chłodzenie magnesu bez konieczności uzupełniania go do końca jego „życia”. Rozwiązanie to nie pogarsza rozdzielczości obrazu ani nie zmniejsza szybkości wykonywania badań. Producent zapewnia o łatwiejszej instalacji urządzenia oraz szybszym powrocie do pracy magnesu po jego wyłączeniu i ponownym uruchomieniu (poniżej 24 godzin podczas gdy średnio czas ten wynosi ok. 3 dni w klasycznych skanerach) [25]. Rozwiązanie wydaje się bardzo korzystne zarówno ekonomicznie jak i środowiskowo – ograniczenie ilości zużywanych drogich pierwiastków, których światowe naturalne zasoby są już mocno nadwyżęzone.

### ■ ENDOSKOPIA KAPSUŁKOWA PILLCAM

Jest o bardzo nowatorskie badanie wykorzystujące najnowocześniejszą technologię z dziedzin miniaturyzacji, optyki i transmisji obrazów. Kapsułki mają wielkość zbliżoną do preparatów witaminowych. Są połykane przez pacjenta i transportowane przez przewód pokarmowy w naturalny sposób – przez

ruchy perystaltyczne. Po dotarciu do miejsca wykonywania badania (jelito cienkie lub jelito grube) wykonują zdjęcia, które następnie przekazywane są do odbiornika noszonego w tym czasie przez pacjenta. Po ukończeniu badania kapsułka jest wydalana, a obrazy przekazywane z odbiornika do komputera i analizowane przez lekarza [26]. Do endoskopii kapsułkowej wykorzystywane są produkty firmy Given Imaging – kapsułki firmy PillCam. Kapsułka zbudowana jest z baterii (ponad połowa wagi całego urządzenia), miniaturowej kamery, lampy LED oraz bezprzewodowego nadajnika. Pacjent w trakcie badania ma przyklejone do ciała elektrody oraz nosi na pasku odbiornik, który sygnalizuje zapisywanie danych miganiem niebieskiej diody. Kapsułki różnią się nieco budową w zależności, czy służą do badania jelita cienkiego czy grubego. Kapsułka PillCam SB3 do badania jelita cienkiego jest mniejsza – wymiary 26 x 11mm, ma tylko jedną kamerę. Natomiast kapsułka do badania jelita grubego mierzy 31 x 11 mm i posiada dwie kamery po obu stronach, ma też szerszy kąt wykonywania zdjęć i częściej je wykonuje [27].

Badanie to w porównaniu z klasyczną kolonoskopią jest bardzo dobrze tolerowane przez badanego, jest bezpieczniejsze i nie niesie ze sobą prawie żadnych powikłań. Głównym powikłaniem jest zatrzymanie kapsułki w przewodzie pokarmowym, dzieje się to jednak rzadko – w mniej niż 1% przypadków. Wymagana jest wtedy interwencja chirurgiczna. W badaniach naukowych udowodniono większą skuteczność diagnostyczną endoskopii kapsułkowej w porównaniu do klasycznej endoskopii, która ma ograniczenia techniczne – długość endoskopu, brak możliwości uwidocznienia wszystkich przestrzeni i stanu błony śluzowej na całej długości jelita, a także często cierpienie pacjenta. Endoskopia kapsułkowa jest metodą zarówno bardzo dokładną diagnostycznie jak i komfortową dla pacjenta.

### SONOPILL

Naukowcy z University of Leeds we współpracy z zespołem z University of Glasgow i in. pod koniec 2018 roku zakończyli prace nad projektem, który rozwija ideę endoskopii kapsułkowej – łączy w sobie elementy endoskopii oraz mikroultrasonografii. Wymyślili sposób, dzięki któremu możliwa jest precyzyjna lokalizacja i kontrola nad wprowadzaną przez odbytnicę kapsułką, która nie tylko ma możliwość zobrazowania jelita kamerą, ale przede wszystkim wykonuje badanie struktury błony śluzowej jelita z wykorzystaniem mikroUSG. Ta technika daje szerokie możliwości diagnostyki nieprawidłowości na poziomie mikroskopowym m.in. wczesnego stadium rozwoju nowotworu, na długo przed tym, zanim uwidocznią się makroskopowo [28]. Konsorcjum naukowców opracowało także technologie

zwaną inteligentną manipulacją magnetyczną [30]. W myśl zasady odpychania i przyciągania się magnesów zbudowano ramię robotyczne wyposażone w zewnętrzne magnesy – ramię przesuwając się delikatnie prowadzi kapsułek (również wyposażoną w magnesy) przez światło jelita w przeciwną stronę do ruchów perystaltycznych. Technika ta eliminuje potrzebę fizycznego połączenia ramienia z kapsułką, a wykorzystanie pola magnetycznego jest bezpieczne dla organizmu [28]. Dodatkowo stworzono system sztucznej inteligencji, który odpowiedzialny jest za korygowanie pozycji kapsułki w jelicie tak, by uzyskać najlepszej jakości obrazy mikroUSG, a także w przypadku jej utknięcia, naprowadzić kapsułek z powrotem w odpowiednie miejsce [29][30]. Kapsułka ma wymiary 39 x 21 mm, posiada głowicę ultradźwiękową, kanał irygacyjny, kamerę, lampę LED, magnes oraz cienki elastyczny kabelek łączący głowicę z komputerem w pokoju badań – tędy przesyłane są dane – obrazy mikroUSG [30].

### BIOSENSORY

Wszczepialny pod skórę mikrosensor, który monitoruje stężenia wybranych parametrów mogących świadczyć o zmianach w stanie zdrowia człowieka, takich jak tlen, glukoza, równowaga elektrolitowa i kwasowo-zasadowa i wiele innych oraz przekazuje te dane do urządzeń mobilnych [31] – prace nad takimi urządzeniami są już w toku. Amerykańska firma Profusa Inc. opracowała projekt o nazwie LumeeTM Oxygen Platform. Jest to wszczepialny biosensor, który stale monitoruje ciśnienie parcjalne tlenu w otaczających tkankach.

Urządzenie składa się z:

Wszczepianego biosensora w formie hydrożelowego elastycznego włókienka długiego na 5 mm, szerokości 500 mikronów [32]. Nowoczesna technologia pozwoliła uzyskać materiał, który jest biogodny z ludzkimi tkankami – przez średnio rok zapobiega to lokalnej reakcji zapalnej, która jest największym problemem, z jakim mierzyć się muszą twórcy jakichkolwiek implantowanych urządzeń [31]. Żel, z którego składa się sensor ma porowatą strukturę dobrze integrującą się z otaczającymi tkankami. Dzięki właściwościom luminescencyjnym pod wpływem wzrostu ciśnienia parcjalnego tlenu w środowisku emituje promieniowanie świetlne.

Czujnika optycznego – umocowany ponad biosensorem do powierzchni skóry odczytuje emitowany przez niego sygnał luminescencyjny o natężeniu, które jest proporcjonalne do zawartości badanej substancji [32].

Aplikacji w smartfonie – naukowcy pracują także nad aplikacją, dzięki której pacjent sam może monitorować stężenie tlenu, czy też innych substancji w swoim organizmie. Dane mogą być udostępniane



lekarzowi lub analitykowi medycznemu, który prowadzi historię pomiarów [32]. W dalszej perspektywie samo urządzenie posiadałoby pamięć, na której zapisywane byłyby pomiary.

## ■ PODSUMOWANIE

We współczesnej diagnostyce medycznej widać kilka wyraźnych trendów. Po pierwsze maksymalna poprawa jakości i rozdzielczości obrazowania. Naukowcy, by osiągnąć ten cel, konstruują wielkie maszyny o coraz wyższej mocy obliczeniowej, co oprócz rozdzielczości zwiększa także szybkość wykonywania badań – ten trend widoczny jest zwłaszcza przy technikach takich jak TK i MR. W ultrasonografii stawiany jest nacisk na mobilność urządzeń, a także diagnostykę na odległość. Widzimy także coraz większy udział sztucznej inteligencji, która ma poprawiać jakość obrazowania i przyspieszać analizę i przesyłanie danych, a także wręcz stawiać diagnozy. Zastępują nas roboty – ich użycie otwiera nowe możliwości zdalnej diagnostyki, precyzyjnej manipulacji mikrouządzeniami, oraz automatyzacji pewnych procesów. Ponadto bardzo widoczna jest miniaturyzacja i integracja urządzeń z ludzkim ciałem. Za cel stawiane jest pokonanie bariery ciała ludzkiego tak, by urządzenia diagnostyczne mogły towarzyszyć nam na co dzień, monitorując w sposób ciągły stan naszego zdrowia. Rozwijane są także aplikacje medyczne zintegrowane ze smartfonami – w dzisiejszych czasach smartfon to obowiązkowe wyposażenie każdego człowieka. Bardzo ciekawe, co jeszcze przyniesie przyszłość w obszarze nowoczesnych technologii w diagnostyce medycznej, gdyż na ten moment mnogość i różnorodność projektów i badań jest bardzo duża.

## ■ PIŚMIENICTWO:

- [1] Encyklopedia PWN [online], Wydawnictwo Naukowe PWN. Dostępny w Internecie: [https://encyklopedia.pwn.pl/haslo/cybernetyka;38\\_88555.html](https://encyklopedia.pwn.pl/haslo/cybernetyka;38_88555.html) [Dostęp 27.05.2021].
- [2] Encyklopedia PWN [online], Wydawnictwo Naukowe PWN. Dostępny w Internecie: <https://encyklopedia.pwn.pl/haslo/robot;3968150.html> [Dostęp 27.05.2021].
- [3] Grzanka Piotr, Tomografia komputerowa [online], Medycyna Praktyczna 2017. Dostępny w Internecie: [https://www.mp.pl/pacjent/badania\\_zabiegi/174820,tomografia-komputerowa](https://www.mp.pl/pacjent/badania_zabiegi/174820,tomografia-komputerowa) [Dostęp 27.05.2021].
- [4] Catalina Imaging – portal o tomografii komputerowej, History of CT Scan [online]. Dostępny w Internecie: <https://catalinaimaging.com/history-ct-scan/> [Dostęp 30.05.2021].
- [5] Dean F. Sittig i in., The Story Behind the Development of the First Whole-body Computerized Tomography Scanner as Told by Robert S. Ledley, *Journal of the American Medical Informatics Association* 2006 Sep-Oct; 13(5): 465–469, doi: 10.1197/jamia.M2127. Dostępny w Internecie: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1561796/> [Dostęp 30.05.2021].
- [6] Prof. dr hab. inż. Grzegorz BUDZIK, mgr inż. Paweł TUREK, Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Konstrukcji Maszyn, Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Technik Wytwarzania i Automatyzacji, Główne właściwości spiralnej tomografii komputerowej, *Problemy Nauk Stosowanych*, 2016, Tom 5, s. 125 – 132.
- [7] Kirsten Boedeker, AiCE Deep Learning Reconstruction: Bringing the power of Ultra-High Resolution CT to routine imaging, Quantifying diagnostic image quality, Canon Medical Systems Corporation, 2017. Dostępny w Internecie: [https://global.medical.canon/publication/ct/2019W\\_P\\_AiCE\\_Deep\\_Learning](https://global.medical.canon/publication/ct/2019W_P_AiCE_Deep_Learning) [Dostęp 30.05.2021].
- [8] Minghuan Wang i in., Deep learning-based triage and analysis of lesion burden for COVID-19: a retrospective study with external validation, *The Lancet* October 2020 Volume 2, ISSUE 10, e506e515, DOI:[https://doi.org/10.1016/S25897500\(20\)30199-0](https://doi.org/10.1016/S25897500(20)30199-0). Dostępny w Internecie: [https://www.thelancet.com/journals/landig/article/PIIS2589-7500\(20\)30199-0/fulltext#%20](https://www.thelancet.com/journals/landig/article/PIIS2589-7500(20)30199-0/fulltext#%20) [Dostęp 27.05.2021].
- [9] I-MED Radiology Network – serwis radiologiczny, Dynamic 4D CT [online]. Dostępny w Internecie: <https://imed.com.au/procedures/dynamic-4d-ct> [Dostęp 27.05.2021].
- [10] Grzanka Piotr, Ultrasonografia [online], Medycyna Praktyczna 2017. Dostępny w Internecie: [https://www.mp.pl/pacjent/badania\\_zabiegi/17482\\_1,ultrasonografia](https://www.mp.pl/pacjent/badania_zabiegi/17482_1,ultrasonografia) [Dostęp 27.05.2021].
- [11] Echoston – serwis o ultrasonografii, Historia ultrasonografii [online]. Dostępny w Internecie: <https://echoston.eu/historia-ultrasonografii/> [Dostęp 27.05.2021].
- [12] Dave Fornell, 5 Key Trends in New Ultrasound Technology [online], *Imaging Technology News*, 2019. Dostępny w Internecie: <https://www.itnonline.com/article/5-key-trendsnew-ultrasound-technology> [Dostęp 27.05.2021].
- [13] Smug – portal o ultrasonografii, Should you buy a Butterfly ultrasound machine? [online]. Dostępny w Internecie: <https://www.ultrasoundtraining.co.uk/resources/news/should-you-buy-a-butterfly-ultrasoundmachine/> [Dostęp 30.05.2021].
- [14] Accrea Engineering – strona internetowa firmy, Projekt ReMeDi Remote Medical Diagnostician [online]. Dostępny w Internecie: <http://engineering.accrea.com/pl/projekt-remedi/> [Dostęp 27.05.2021].
- [15] Scott A. Dulchavsky i in., Advanced Ultrasound For the Space Program and on Earth, *NASA Technology Innovation*, Vol 15; 3, 2010; NP-2010-06-658-HQ, adaptacja artykułu Feb 29 2012 dostępna online: [https://www.nasa.gov/mision\\_pages/station/research/benefits/ultrasound.html](https://www.nasa.gov/mision_pages/station/research/benefits/ultrasound.html) [Dostęp 30.05.2021].
- [16] Jennifer Law and Paul B. Macbeth, Ultrasound: From Earth to Space, *Mcgill J Med*. 2011 June, PMID: PMC3296555. Dostępny w Internecie: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3296555/> [Dostęp 27.05.2021].
- [17] Satoshi Iwase i in., Effects of Microgravity on Human Physiology, *IntechOpen* Feb 2020 [online]. Dostępny w Internecie: <https://www.intechopen.com/books/beyond-leohuman-health-issues-for-deep-spaceexploration/effects-of-microgravity-on-humanphysiology> [Dostęp 30.05.2021].
- [18] Józef Terlecki, Zjawisko rezonansu magnetycznego w rozdziale 21: Wpływ pola elektrycznego na żywy organizm. W: red. nauk. Feliks Jaroszyk, Biofizyka. PZWL Warszawa 2008, wyd. 2, s. 735-737.
- [19] Questions and answers in MRI – portal o rezonansie magnetycznym, The Discovery of NMR [online]. Dostępny w Internecie: <http://mriquestions.com/whodiscovered-nmr.html> [Dostęp 30.05.2021].
- [20] Questions and answers in MRI – portal o rezonansie magnetycznym, Invention of MRI Imaging [online]. Dostępny w Internecie: <https://mri-q.com/whoinvented-mri.html> [Dostęp 30.05.2021].
- [21] Anna Nowogrodzki, The world's strongest MRI machines are pushing human imaging to new limits, *Nature* 563, 24-26 (2018), doi: <https://doi.org/10.1038/d41586-018-07182-7>, Dostępny w Internecie: <https://www.nature.com/articles/d41586-018-07182-7> [Dostęp 27.05.21].
- [22] University of Minnesota – strona internetowa uczelni, U Scientists Scan World's First 10.5-Tesla Human MRI Image, 2018 [online]. Dostępny w Internecie: <https://research.umn.edu/inquiry/post/uscientists-scan-worlds-first-105-tesla-human-mriimage> [Dostęp 27.05.2021].
- [23] Metrolab – strona internetowa firmy, How the CEA/Irfu developed Iseult; the gigantic 11.7 T MRI magnet! Wywiad z Lionelem Quettier, 24.02.2020 | Metronews, MFC2046, MRI. Dostępny w Internecie: <https://www.metrolab.com/gigantic-117-t-mri-magnet-iseult-a-discussion-with-lionelquettier/> [Dostęp 27.05.2021].
- [24] Frederic Joliot Institute for Life Sciences – strona internetowa instytutu, NeuroSpin platforms [online]. Dostępny w Internecie: [https://joliot.cea.fr/drj/joliot/en/Pages/platforms\\_and\\_infrastructures/platforms/NeuroSpin\\_Platforms.aspx](https://joliot.cea.fr/drj/joliot/en/Pages/platforms_and_infrastructures/platforms/NeuroSpin_Platforms.aspx) [Dostęp 30.05.2021].
- [25] Philips – strona internetowa firmy, Magnes BlueSeal, Nowa rzeczywistość w badaniach rezonansem magnetycznym z obsługą bezhelową [online]. Dostępny w Internecie: <https://www.philips.pl/healthcare/resources/landing/the-next-mr-wave/sealed-mr-technology> [Dostęp 27.05.2021].
- [26] MultiMed – portal medyczny, Endoskopia kapsułkowa [online]. Dostępny w Internecie: <https://multimed.pl/bazawiedzy/endoskopia/endoskopia-kapsulkowa-naczyn-polega-wskazania-przygotowanie-opinieca/> [Dostęp 30.05.2021].
- [27] Certus – strona internetowa szpitala, Endoskopia kapsułkowa jelita grubego [online]. Dostępny w Internecie: <https://www.certus.med.pl/bazawiedzy/badania-endoskopowe/endoskopiakapsulkowa-jelita-grubego> [Dostęp 27.05.2021].
- [28] Science Daily – serwis naukowy, A miniature robot that could check colons for early signs of disease, University of Leeds, June 19, 2019 [online].

Dostępny w Internecie: <https://www.sciencedaily.com/releases/2019/06/190619142523.htm> [Dostęp 27.05.2021].

[29] Joseph C. Norton i in., Intelligent magnetic manipulation for gastrointestinal ultrasound, Science Robotics 19 Jun 2019: Vol. 4, Issue 31, eaav7725 DOI: 10.1126/scirobotics.aav7725. Dostępny w Internecie: <https://robotics.sciencemag.org/content/4/31/eaav7725> [Dostęp 27.05.2021].

[30] Helen Knight, Robotic capsule inspects colon for cancer, The Engineer 21st June 2019, Dostępny w Internecie: <https://www.theengineer.co.uk/roboticcapsule-sonopill-cancer/> [Dostęp 30.05.2021].

[31] Genetic Engineering & Biotechnological News – portal naukowy, Profusa Wins \$7.5M DARPA Biosensor Grant, 2016 [online]. Dostępny w Internecie:

<https://www.genengnews.com/news/profusa-wins-7-5m-darpa-biosensor-grant/> [Dostęp 27.05.2021]. Profusa – strona internetowa firmy, Profusa is pioneering tissue-integrating biosensors for continuous monitoring of body chemistries [online]. Dostępny w Internecie: <https://profusa.com/ourvision/> [Dostęp 27.05.2021].



# Roboty w służbie medycyny



## RobinHeart

polski produkt, współpraca  
FRK - Meden-Inmed

## Vertimo Hi-Lo Step

polski produkt, współpraca  
PIAP - Meden-Inmed

