

# Roboty Chirurgiczne

Ryszard Tadeusiewicz

kolekcja felietonów opublikowanych w Gazecie Myślenickiej  
i opublikowanych na fala RMF Classic w 2020 roku

## Wstęp. Historia robotów



Do obejrzenia i posłuchania na <https://youtu.be/cvDqxn9SeDY>

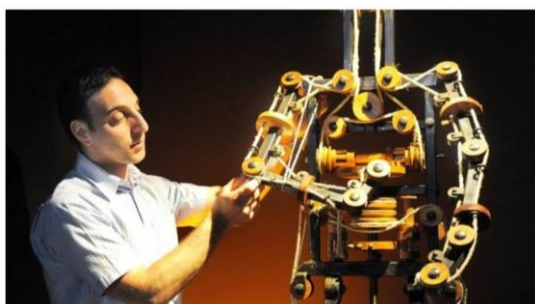
Często w różnych kontekstach słyszymy o robotach. O tych najnowszych napiszę niebawem, dzisiaj jednak chciałbym powiedzieć kilka słów o historii tych zadziwiających maszyn.

Słowo „robot” zagościło najpierw w literaturze, gdyż na długo przed zbudowaniem pierwszej maszyny godnej tego, by być nazwaną robotem – o twórcze tego rodzaju pisał (w 1923 roku) Karel Čapek w dramacie *R.U.R. (Rossumovi Univerzální Roboti)*. Drugim literatem, którego nazwisko związane jest z robotyką, jest Isaac Asimov, którego opowiadanie *Runaround* z 1942 roku uważane jest także za profetyczną zapowiedź ery robotów.

Po literatach robotami zainteresowali się filmowcy, którzy w niezliczonych ekranizacjach wprowadzali różne androidy (czyli roboty człękkształtne) – oczywiście nie troszcząc się zupełnie o to, czy wymyślone przez nich maszyny są technicznie realizowalne, czy też nie.



O techniczną realizowalność projektowanego robota zadbał natomiast Leonardo da Vinci, który poza tym, że był genialnym malarzem, architektem, filozofem, muzykiem, pisarzem, odkrywcą, matematykiem, anatomem i geologiem – był także znakomitym mechanikiem i natchnionym wynalazcą. Lista urządzeń technicznych wymyślonych przez Leonarda da Vinci jest zbyt długa, by ją tu przytaczać, natomiast z pewnością trzeba wskazać, że w jego szkicach z 1445 roku odnaleziono projekt mechanicznego rycerza, który mógł się sam poruszać.



Nie wiadomo, czy Leonardo da Vinci swojego mechanicznego rycerza zbudował, czy też nie, ale w 2010 roku włoski artysta i mechanik Gabriele Nicolai na podstawie jego szkiców najpierw odtworzył mechanizm napędowy a potem całego robota – i okazało się, że był on zdolny do wykonywania pewnych prostych czynności.

Pierwsze praktycznie użyteczne roboty bynajmniej nie przypominały człękkształtnych twórców z filmów *science fiction*, ani oczywiście robota-rycerza

Leonarda da Vinci. Twórcy tych robotów doszli do wniosku, że odtwarzanie w mechanicznym pomocniku pełnej sylwetki człowieka jest niepotrzebne, bo jedynym elementem ludzkiego ciała, który jest potrzebny w przemyśle, jest ręka. Dlatego oglądając w fabrykach czy w laboratoriach naukowych współczesne roboty przemysłowe, niezorientowani obserwatorzy nieraz dziwią się ich wyglądowi. Roboty te bowiem wcale nie przypominają postaci całego człowieka, lecz są bardzo sprawnymi technicznymi odpowiednikami ludzkiej ręki – zresztą bardzo uproszczonej.



Te trochę pokraczne, ale bardzo użyteczne roboty zaczęły być stosowane w przemyśle w latach 60. XX wieku. Pierwsza wytwórnia robotów przemysłowych ruszyła już w 1956 roku. Fabryka nazywała się Unimation i wytwarzała roboty o nazwie Unimate według projektu **George'a Charlesa Devola**, pierwszego człowieka, który opatentował koncepcję robota (U.S. Patent 2,988,237).

Fabrykanci, przyszli użytkownicy robotów, początkowo odnieśli się do koncepcji mechanicznej ręki z dużą rezerwą. Pierwszą linię produkcyjną częściowo obsługiwaną przez roboty uruchomiła w 1961 roku firma General Motors w fabryce Inland Fisher Guide Plant w Ewing Township (New Jersey). Roboty doskonale zdały egzamin. W ciągu 10 lat eksploatacji przepracowały 100 000 godzin i udowodniły, że mogą pracować szybko, wydajnie, a także – co jest szczególnie ważne – bardzo precyzyjnie. Dokładność pozycjonowania tych pierwszych robotów wynosiła 1/10 000 cala, co było jedną z przyczyn ich pozytywnej oceny przez użytkowników.

Sukces robota Unimate spowodował, że w 1969 roku **Victor Scheinman** opracował (w Stanford University a potem w MIT) konstrukcję doskonalszego robota o nazwie PUMA. Nazwę tę tłumaczy się na dwa sposoby: Programmable Universal Machine for Assembly,



albo Programmable Universal Manipulation Arm. Był to bardzo udany robot, który był produkowany w USA przez Westinghouse Electric, ale także w Europie przez firmę Nokia, znaną bardziej z produkcji telefonów komórkowych. Łącznie wyprodukowano kilka tysięcy robotów PUMA i były one bardzo popularne w różnych gałęziach przemysłu, a niektóre ich egzemplarze pracują do dziś.

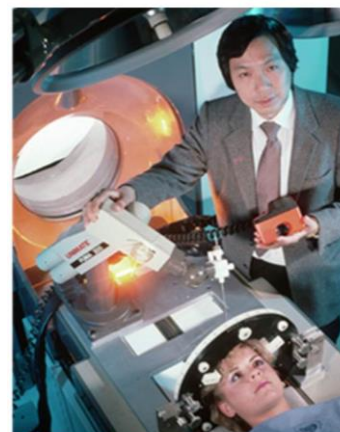
## Roboty chirurgiczne. Część 1 – Trudne początki



Do obejrzenia i posłuchania na <https://youtu.be/Xa1p9tGZn2Y>

We wcześniejszych felietonach pisałem o robotach („Historia robotów”) i o inżynierii biomedycznej (wielokrotnie). Dzisiaj te dwa wątki połączę i napiszę o robotach chirurgicznych.

Wielka precyzja i powtarzalność pracy robotów pracujących w przemyśle prowokowały wręcz do tego, by to nowoczesne narzędzie spróbować wykorzystać także w chirurgii. Pierwszym, który to zrobił, był **dr Yik San Kwoh** w Long Beach Hospital (Kalifornia). Zastosował on w 1985 roku robota PUMA 560 do wprowadzenia igły biopsyjnej do mózgu pacjenta. Zanim wykonał tę czynność, na głowie człowieka, przeprowadzał (podobno) bardzo wiele prób, nakłuwając za pomocą



robota dojrzałe arbuzy i sprawdzając, gdzie trafiała igła. Trzeba przyznać, że rola robota w tej operacji była bardzo ograniczona: posłużył on tylko do tego, żeby ustawić igłę do biopsji we właściwym położeniu (gdy pacjent był daleko od niego), po czym robota **unieruchomiono** (wyłączono nawet zasilanie, żeby się przypadkowo nie poruszył!). Następnie pacjenta wsunięto pod robota i lekarz, korzystając z ustawionej we właściwym położeniu i unieruchomionej igły – ręcznie wprowadził ją do mózgu pacjenta.

Pomimo tych środków ostrożności operacja wywołała niezbyt korzystne komentarze zarówno w środowiskach medycznych, jak i wśród techników. Ciekawa była zwłaszcza reakcja producenta robotów PUMA (Westinghouse Limited) na tę rewelację – otóż wydał on oświadczenie, w którym **odmówił zgody** na używanie jego robotów w celach chirurgicznych na sali operacyjnej! W oświadczeniu podkreślano, że konstruktorzy robota zakładali, iż będzie on używany w specjalnie ogrodzonych pomieszczeniach, do których w czasie pracy robota ludzie nie mają wstępu. To założenie było konieczne, bo ówczesne roboty przemysłowe były uważane za urządzenia niebezpieczne. Zresztą nie bez racji – robot przemysłowy to maszyna bardzo silna, a przy tym szybka i nieposiadająca zmysłów (w szczególności czujników obecności człowieka). Jeśli więc człowiek znajdzie się na drodze zaprogramowanego ruchu robota – może zostać przez niego poturbowany. Zdarzały się zresztą takie wypadki. W związku z tym w przemyśle obowiązywała zasada: tam gdzie są roboty, nie może być ludzi, a tam, gdzie są ludzie – nie ma robotów. A tu nagle robot na sali operacyjnej, w bezpośrednim kontakcie z pacjentem i z lekarzami!



Mimo kilkakrotnego potwierdzenia przez zespół dr. Kwoha, że robot może bardzo sprawnie, precyzyjnie, szybko i w pełni automatycznie ustawiać narzędzie chirurgiczne (igłę do biopsji) we właściwym stereotaktycznie położeniu – prace te przerwano.

## Roboty chirurgiczne. Część 2 – Błędny zaulek



Do obejrzenia i posłuchania na [https://youtu.be/OUNxuHSKQ\\_0](https://youtu.be/OUNxuHSKQ_0)

W poprzednim tygodniu pisałem o pierwszym użyciu robota na sali operacyjnej, które – chociaż zakończyło się sukcesem – jednak nie wywołało pozytywnych reakcji twórców robotów, którzy obawiali się, że w zetknięciu z wrażliwym i łatwym do zranienia ciałem człowieka – robot może okazać się niebezpieczny.

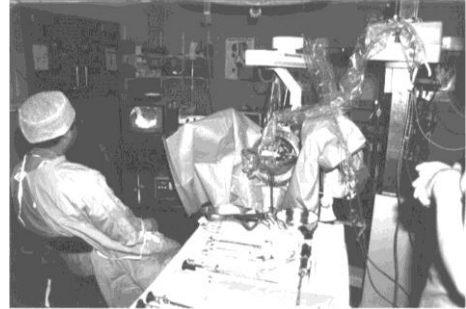


Zainteresowanie chirurgów możliwościami, jakie stwarzała ówczesna robotyka, na szczęście jednak nie zmalowało. Już w 1988 roku podjęta została kolejna udana próba zastosowania robota przy operacji łagodnego guza prostaty. Odważnym chirurgiem był **dr Senthil Nathan**, a operacja przeprowadzona była w Guy's and St Thomas' Hospital w Londynie przy użyciu robota o nazwie PROBOT. Powstał on w Imperial College w Londynie jako konstrukcja dedykowana do zastosowania



w chirurgii. Był zupełnie niepodobny do PUMY i do innych robotów przemysłowych. Jego głównym elementem była rama, a w niej pierścień prowadzący tnące narzędzie zamocowane na końcu resektoskopu. Ze względu na swoją kinematykę PROBOT mógł usuwać fragmenty tkanki miękkiej o kształcie ściętego bocznie stożka, w związku z tym planując zabieg, trzeba było zaprojektować obszar cięcia w formie zbioru takich stożków. Trzeba było znaleźć kąt rozwarcia stożka w zależności od głębokości położenia usuwanego fragmentu wzdłuż osi prostaty, a także opracować schemat rozmieszczenia poszczególnych wycinanych stożków na przekroju narządu.

Twórcy PROBOTa ambitnie chcieli, by robot chirurgiczny działał podobnie, jak roboty przemysłowe: dostawał kompletny program przeprowadzenia operacji i korzystając z tego programu działał całkowicie sam. Ten ideał udało się zrealizować. Po zaplanowaniu przebiegu operacji (do czego służyło specjalnie stworzone do tego celu oprogramowanie) chirurg mógł już jedynie biernie obserwować, jak robot wykonuje operację, nie angażując się ani w sam zabieg, ani w sterowanie robota.



Niestety to podejście nie dało się stosować na dłuższą metę. Organizm każdego człowieka jest inny, więc kształt, rozmiary i lokalizacja narządu, na którym trzeba wykonać operację, są różne. Różne są także kształty i lokalizacje tych fragmentów narządu, które należy w wyniku operacji usunąć. W efekcie aprioryczne programowanie robota, bardzo efektywne w zastosowaniach przemysłowych, gdzie kształty i wymiary obrabianych elementów finalnych wyrobów są powtarzalne w długich seriach – w przypadku robotów chirurgicznych nie zdaje egzaminu. Dla każdego pacjenta trzeba było tworzyć osobny program, który byłby potem tylko raz użyty. To się nie opłaca.

Co więc zrobiono?

## Roboty chirurgiczne. Część 3 – siła i precyzja



Do obejrzenia i posłuchania na <https://youtu.be/u9W1GBwkCuc>

Kontynuując rozpoczęty w zeszłym tygodniu wątek historyczny dotyczący różnych pionierskich robotów chirurgicznych, można wspomnieć o wprowadzonym do użytku w 1992 roku robocie ROBODOC. Był on wąsko wyspecjalizowany, podobnie jak opisany tydzień temu PROBOT, przy czym jego domeną była chirurgia twarda (ortopedyczna), a konkretnie operacje stawu biodrowego. Przy operacjach ortopedycznych chwilami chirurg musi działać z dużą siłą – i w tym zakresie robot może go skutecznie wspomagać. Ponadto przy chirurgii ortopedycznej konieczna jest duża precyzja,



którą może zapewnić robot kierując się zestawem punktów orientacyjnych na ciele pacjenta oraz obrazowaniem z tomografu komputerowego, natomiast chirurg tak precyzyjnego systemu odniesienia nie ma.

Koncepcję robota o wymienionych wyżej właściwościach opracował w 1986 roku **dr Howard Paul** we współpracy z ortopedą, **dr. Williamem Bargarem**, ale do jego zbudowania i praktycznego użycia potrzeba było aż 6 lat. Robota wykonała

specjalnie powołana w tym celu (w listopadzie 1990 roku) firma Integrated Surgical Systems (ISS) przy współpracy z firmą komputerową IBM, która wyłożyła w celu utworzenia ISS kwotę 3 mln dolarów. Robota ROBODOC zbudowano z gotowych modułów, łącząc część mechaniczną robota przemysłowego produkowanego przez firmę Sankyo Seiki Mfg Co. Ltd. z oprogramowaniem ORTHODOC (Orthodoc Presurgical Planner). Zanim robot ten (określany skromnie jako Surgical Assistant System) został użyty w operacjach przeprowadzanych na ludziach, dr Paul (który był weterynarzem) wykonał za pomocą robota ROBODOC aż 26 operacji stawu biodrowego u psów. Wreszcie 7 listopada 1992 roku przeprowadzono (w Sutter General Hospital w Kalifornii) pierwszą operację stawu biodrowego u człowieka. Pacjentem był 64-letni mężczyzna. Operacja w pełni się udała, co spowodowało, że FDA (US Food and Drug Administration – amerykańska instytucja nadzorująca między innymi procesy wprowadzania nowych technik do medycyny) dopuściła do przeprowadzenia 10 następnych operacji przy użyciu tej techniki jako tzw. *feasibility study* (studium wykonalności).

Wszystkie 10 operacji wykonanych przez robota ROBODOC zakończyło się sukcesem, w związku z czym w październiku 1993 roku FDA uruchomiła badania porównawcze na grupie 300 pacjentów, z których 150 operowanych było za pomocą robota ROBODOC, a 150 w sposób tradycyjny (ręcznie). Dla przeprowadzenia tych badań eksperymentalnych wykonano następane egzemplarze robota ROBODOC i zainstalowano je w dwóch szpitalach amerykańskich (New England Baptist w Bostonie oraz w Shadyside w Pittsburghu), a także w szpitalu Berufsgenossenschaftliche Unfallklinik we Frankfurcie (w Niemczech). Jeszcze przed zakończeniem wzmiankowanych badań porównawczych roboty ROBODOC zaczęły być sprzedawane właściwie na cały świat, natomiast po ogłoszeniu wyników badań zapotrzebowanie na nie tak wzrosło, że firma ISS zaczęła być notowana na nowojorskiej giełdzie.



Był to pierwszy znaczący sukces chirurgii robotycznej.

## Roboty chirurgiczne. Część 4 – pierwszy krok we właściwym kierunku



Do obejrzenia i posłuchania na <https://youtu.be/OJHYua2vhVM>

Omówione we wcześniejszych częściach tego cyklu publikacji roboty chirurgiczne PROBOT i ROBODOC naśladowały pracę robotów przemysłowych w tym sensie, że do każdej wymaganej operacji budowany był specjalny program, dokładnie planujący, co i jak powinien wykonać robot – a potem robot wykonywał wszystkie czynności automatycznie, zastępując chirurga (PROBOT) lub wykonując w jego zastępstwie większość wymaganych czynności (ROBODOC). Ale jak wspominałem w drugim rozdziale cyklu - ta droga okazała się błędna. Organizm każdego człowieka jest inny, więc kształt, rozmiary i lokalizacja narządu, na którym trzeba wykonać operację, są różne. Różne są także kształty i lokalizacje tych fragmentów narządu, które należy w wyniku operacji usunąć. W efekcie aprioryczne programowanie robota, bardzo efektywne w zastosowaniach przemysłowych, gdzie kształty i wymiary obrabianych elementów finalnych wyrobów są powtarzalne

w długich seriach – w przypadku robotów chirurgicznych nie zdaje egzaminu. Dla każdego pacjenta trzeba by było tworzyć osobny program, który byłby potem tylko raz użyty. To się nie opłaca.

Dlatego w nowoczesnych robotach chirurgicznych stosowana jest metoda ręcznego sterowania pracą robota przez chirurga siedzącego przy specjalnej konsoli, na której widzi on pole operacyjne (zwykle stereoskopowo i w powiększeniu) oraz przy pomocy wygodnych manipulatorów steruje pracą ramion robota wyposażonych w narzędzia chirurgiczne, wykonujących właściwy zabieg na chorym narządzie. Zaleta takiego działania polega na tym, że endoskop z kamerami dostarczającymi obraz na konsolę i oświetlaczem wprowadza się do wnętrza ciała pacjenta przez mały otwór (o średnicy ołówka) i przez podobne otwory wprowadza się ramiona robota, które wewnątrz ciała wszystko, co potrzeba, przemieszczają, przytrzymują, tną i zszywają. Zranienie pacjenta jest minimalne, zmęczenie lekarza również – a efekt jest zwykle lepszy, niż przy tradycyjnej operacji.



Pierwszym robotem medycznym, który działał wg. opisaney zasady, był ZEUS.

Roboty ZEUS produkowane były od 1995 roku, przy czym 1996 rok poświęcono na ich testowanie na zwierzętach, a potem stosowano je już do wykonywania operacji na ludziach, zwłaszcza że uzyskano na to aprobatę FDA, instytucji ważnej w USA, ale bardzo opiniotwórczej także w skali całego świata. W 1998 roku przy pomocy robotów ZEUS wykonano wiele zabiegów spełniających warunki chirurgii małoinwazyjnej, w tym także operacji na bijącym sercu – między innymi zakładanie bajpasów tętnic wieńcowych (CABG – *coronary artery bypass surgery* oraz E-CABGTM – *endoscopic coronary artery bypass grafting*). Warto dodać, że w momencie wprowadzania robota ZEUS firma Computer Motion miała już wyrobioną markę w środowiskach medycznych, ponieważ wcześniej produkowała cenione systemy endoskopowe AESOP (Automated Endoscopic System for Optimal Positioning).



Ciekawa była też droga, jaką firma doszła do produkcji tych właśnie systemów dla zastosowań medycznych. Otóż zanim zaczęła pracować na rzecz szpitali i służby zdrowia – firma funkcjonowała jako SBIR (Small Business Innovation Research) przy NASA (amerykańskiej Narodowej Agencji Aeronautyki i Przestrzeni Kosmicznej). Dla potrzeb NASA firma Computer Motion wytwarzała systemy zdolne do dokonywania na orbicie delikatnych regulacji oraz napraw takich elementów wahadłowca kosmicznego, do których ludzie bezpośrednio nie mogli dotrzeć ze względu na ciasnotę lub z powodu miniaturowych rozmiarów elementów wymagających manipulacji. Jak wiadomo, pojazd kosmicznego na ogół nie da się naprawiać od zewnątrz, więc do każdego uszkodzonego czy wadliwie działającego elementu dotrzeć trzeba od środka, a do tego celu sprawny endoskop jest po prostu niezbędny.

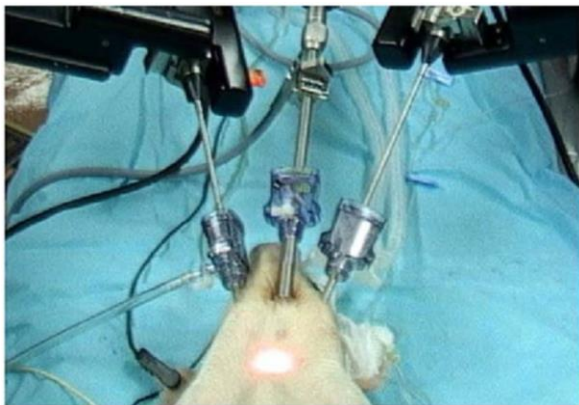


Zahamowanie rozwoju floty wahadłowców kosmicznych (obecnie całkowicie wycofanych z użycia) spowodowało, że firma, która przez lata zdobywała doświadczenie, „grzebiąc w trzewiach” statku kosmicznego, musiała zająć się czymś innym – przeniosła więc te doświadczenia na „grzebanie we wnętrzościach człowieka”. Zrobiła to z bardzo dobrym skutkiem i zyskała dobrą opinię w środowiskach medycznych. Był to znakomity „posag” dla robota ZEUS, który był wersją AESOP mającą możliwości nie tylko obserwacji, ale i manipulacji we wnętrzu ciała pacjenta. Tych możliwości manipulacji było bardzo dużo, wystarczy powiedzieć, że w 2000 roku ZEUS był wyposażony w 28 różnych narzędzi chirurgicznych.

Dzieje tego robota opiszę w przyszłym odcinku tego cyklu.

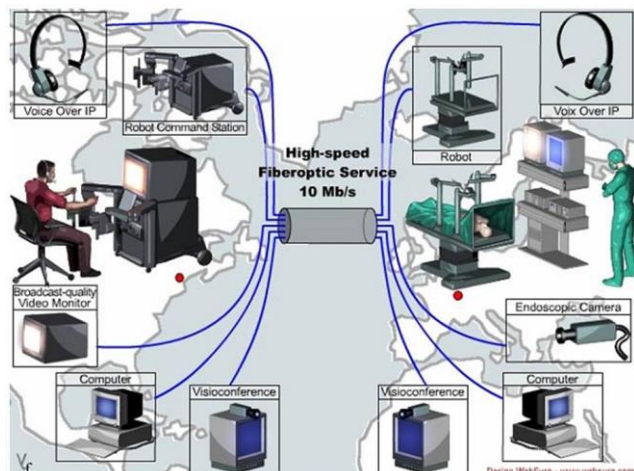
## Roboty chirurgiczne. Część 5 – Sukcesy medyczne i porażka ekonomiczna

W zeszłym tygodniu w felietonie należącym do tej serii opisałem skrótowo robota chirurgicznego o nazwie ZEUS. Robot ten wyposażony był w endoskopową kamerę (sterowaną głosem lekarza!), wprowadzaną do wnętrza ciała pacjenta, która przekazywała na konsolę, przy której siedział chirurg, trójwymiarowy obraz operowanego narządu i w wykonujące operację dwa ramiona robocze, także



wprowadzone do wnętrza ciała pacjenta i sterowane elektronicznie za pomocą manipulatorów trzymany w rękach chirurga. Przypomnę (była o tym mowa w poprzednim artykule), że ZEUS nie był robotem programowanym do samodzielnego wykonywania operacji, tylko rodzajem precyzyjnego manipulatora, sterowanego ze specjalnej konsoli przez chirurga, który widział pole operacyjne poprzez wprowadzaną do wnętrza ciała pacjenta kamerę endoskopową.

Roboty ZEUS były stosowane przy operacjach kardiochirurgicznych, w chirurgii jamy brzusznej, ginekologii i urologii. W latach 2000 – 2002 przeprowadzono przy pomocy tego robota kilkadziesiąt operacji – wszystkie udane. Ponieważ robot wykonujący operację na pacjencie był fizycznie oddzielony od konsoli, przy której pracował chirurg (pomiędzy tymi dwoma częściami były tylko elektroniczne połączenia komunikacyjne) 7 września 2001 roku podjęto pionierską próbę teleoperacji. Chirurg (Jacques Marescaux) z konsolą sterującą znajdował się w Nowym Jorku, a 68-letnia pacjentka poddana operacji znajdowała się w Strasburgu. Łączność odbywała się przez Internet. Oczywiście przy stole operacyjnym znajdowała się kompletna ekipa chirurgów gotowych wkroczyć do akcji, gdyby coś poszło nie tak. Nie musieli nawet kiwnąć palcem – robot wykonał operację perfekcyjnie. Cała akcja trwała 54 minuty.



Robot ZEUS nie był idealny. Miał duże wymiary, więc w wielu salach operacyjnych trudno go było umieścić. Operacje wykonywane przy użyciu robota trwały dłużej, niż operacje wykonywane przez chirurga w sposób tradycyjny. No i był bardzo drogi – w 2003 roku kosztował 975 tys. USD. Ale operacje wykonywane przez robota były znacznie wygodniejsze dla lekarza (wygodnie siedział przy konsoli zamiast pochyłać się nad pacjentem na stole operacyjnym) i dla pacjenta (zamiast dużej rany pooperacyjnej miał tylko małe otwory przez które do wnętrza ciała wnikała kamera endoskopowa i ramiona robota wykonujące operację).

Robot ZEUS miał jedną zaletę w stosunku do używanych obecnie robotów chirurgicznych. Jego trzy ramiona mocowano do stołu operacyjnego, co miało zaletę – bo można było poruszać stołem w czasie operacji. Stało punktowe sferyczne kinematycznie roboty używane obecnie, które stoją na osobnej nodze, mają tę zaletę, że są stabilne, ale z drugiej strony jeśli by ktoś z jakichś powodów ruszył stołem operacyjnym - to trzeba w nich od nowa trzeba ustawiać stały punkt robota względem ciała pacjenta.

Robot ZEUS został jednak wyeliminowany z rynku w ten sposób, że produkująca go firma, Computer Motion, została w 2003 roku wykupiona przez produkującą konkurencyjnego robota medycznego Da Vinci firmę Intuitive Surgical Inc. Nowy właściciel natychmiast wstrzymał budowę i sprzedaż robotów ZEUS, dzięki czemu Da Vinci stał się niekwestionowanym liderem na rynku robotów chirurgicznych. O tym robocie napiszę w przyszłym tygodniu.

## Roboty chirurgiczne. Część 6 – Robot da Vinci



Do obejrzenia i posłuchania na <https://youtu.be/zFQO1M7r9Ug>

Obecnie na świecie większość robotów chirurgicznych to roboty systemu da Vinci wytwarzane przez firmę Intuitive Surgical Inc. Robot taki, podobnie jak opisywany w poprzednim odcinku robot ZEUS, składa się z konsoli lekarza, który widzi stereoskopowy obraz pola operacyjnego i kieruje ruchami narzędzi chirurgicznych wewnątrz ciała pacjenta oraz z robota, który ma styczność z ciałem pacjenta.



Robot ma cztery ramiona, które chirurg może dowolnie przemieszczać. Na końcach tych ramion znajdują się elementy robocze, które przez małe otwory wprowadzane są do wnętrza ciała pacjenta. Układ tych ramion odpowiednio sterowany przez operatora może pracować „za trzech”: chirurga prowadzącego, chirurga asystującego i asystenta

kierującego torem wizyjnym (endoskopem). Endoskop jest bardzo ważnym składnikiem wyposażenia robota, bo dzięki niemu chirurg może zobaczyć pole operacyjne. Obraz przekazywany do oczu chirurga jest stereoskopowy (końcówka ramienia endoskopowego zwiera dwie kamery, przekazujące obraz odpowiednio dla lewego i prawego oka lekarza). Obraz może być powiększany (do 30 razy). Końcówka ramienia endoskopowego zwiera także lampę i zielony laser dla wykrywania naczyń krwionośnych.



Pozostałe ramiona są przeznaczone do manipulacji narzędziami chirurgicznymi. To przy ich pomocy lekarz wykonuje we wnętrzu ciała pacjenta wszystkie zabiegi. Narzędzie chirurgiczne zamocowane na końcu takiego ramienia naśladuje ruchy ręki chirurga siedzącego przy konsoli, dzięki czemu robot robi wyłącznie to, czego żąda lekarz. Na pierwszy rzut oka jest duże podobieństwo pomiędzy wykonywaniem operacji za pomocą robota chirurgicznego a przeprowadzaniem zabiegów przy użyciu szerzej znanych technik endoskopowych czy laparoskopowych. Różnice są jednak istotne.



Pierwsza z nich polega na sposobie przenoszenia ruchów ręki chirurga na ruch narzędzi, za pomocą których przeprowadzana jest operacja. W endoskopach stosowane są przeniesienia mechaniczne. Natomiast w robocie chirurgicznym ruch końcówek roboczych jest sterowany elektronicznie, za pośrednictwem komputera. Lekarz, poruszając elementami sterującymi na konsoli, niczego tym sposobem nie napędza, tylko informuje komputer, jaki ruch powinien zostać wykonany. Silniki elektryczne usytuowane w ramionach robota sterowane przez komputer (a nie dłonie chirurga) wymuszają odpowiedni ruch narzędzi chirurgicznych.

Ma to wiele zalet. Po pierwsze komputer może eliminować niekorzystne składniki ruchu (na przykład drżenie rąk chirurga), które nie przeniosą się na narzędzie przeprowadzające zabieg wewnątrz ciała pacjenta. Po drugie eliminowane są przypadkowe gwałtowne ruchy chirurga, które mogłyby doprowadzić do urazów wewnątrz ciała. Po trzecie wreszcie – i to jest chyba najważniejsze – komputer może przeskalowywać duże (swobodne) ruchy rąk lekarza na bardzo małe i precyzyjne ruchy końcówek roboczych. W ten sposób można bardzo wygodnie i bez długotrwałego treningu wykonywać zabiegi, które przy ich ręcznym wykonywaniu wymagałyby ogromnej zręczności, precyzji i maksymalnego, męczącego skupienia.

Dodatkową zaletą używania robotów chirurgicznych jest możliwość planowania operacji przed jej wykonaniem, a podczas zabiegu możliwość śledzenia zgodności postępowania z zaplanowanym scenariuszem i ewentualnie raportowanie odstępstw.

Roboty da Vinci są bardzo popularne: szacuje się, że we wszystkich szpitalach na świecie pracuje ich ponad 5,5 tysiąca i wykonały one w 2019 roku 1,25 mln operacji. W Polsce aż do końca 2010 roku nie było żadnego takiego urządzenia. Potem pierwsze dwa roboty pojawiły się w szpitalach we Wrocławiu (2010) i w Toruniu (2016), ale Agencja Oceny Technologii Medycznych wydała w 2014 roku negatywną opinię odnośnie stosowania robota da Vinci i praktycznie stały one przez trzy lata nie używane, bo koszt jednego zabiegu wykonanego przy pomocy robota był szacowany na kilkadziesiąt tysięcy zł, a zabiegi te nie należały do tzw. koszyka świadczeń gwarantowanych, więc nie były finansowane przez NFOZ. Na szczęście Agencja Oceny Technologii Medycznych w 2017 roku zmieniła zdanie i zabiegi wykonywane przy pomocy robotów „ruszyły z kopyta”. W dniu 14.01.2020 roku ukazał się materiał prasowy w serwisie pulsmedycyny.pl informujący, że w 2019 roku nastąpił przełom: wykonano 900 zabiegów przy użyciu robotów da Vinci (w 2018 roku było tych zabiegów tylko 60).

## Roboty chirurgiczne. Część 7 – polski Robin Heart



Do obejrzenia i posłuchania na <https://youtu.be/TnsJJebvPrE>

Roboty chirurgiczne opisywane w sześciu wcześniejszych felietonach były konstruowane, badane, a potem produkowane w USA i UK. Pora teraz na wzmiankę o robotach chirurgicznych, które powstawały i były badane w Polsce. Ich pomysłodawcą i twórcą był i jest prof. **Zbigniew Nawrat**. Miejszem, gdzie powstał polski robot jest Fundacja Rozwoju Kardiochirurgii (FRK) im prof. Zbigniewa Religi w Zabrze. Przygotowując ten artykuł porozumiałem się z prof. Nawratem i poniższy tekst został z nim skonsultowany.

Zacznę od historii:

Pierwsze wersje omawianego tu robota, oznaczane jako Robin Heart 0, Robin Heart 1 i Robin Heart 2 powstały w latach 2000 – 2003 i miały charakter doświadczalny (wykonywały operacje na fantomach). W latach 2007 – 2008 powstała wersja Robin Heart Vision, wyposażona w endoskop, a w 2009 roku zbudowano modułowego robota, którego nazwano Robin Heart mc<sup>2</sup>. Jego zaletą była (będąca przedmiotem oryginalnego wynalazku) platforma, która właściwie stanowiła w pełni funkcjonalnego mini robota chirurgicznego (posiadającego 2 narzędzia i tor wizyjny).

Kolejną zaletą był fakt, że narzędzia mechatroniczne, którymi posługiwał się robot, były samodzielne – czyli można było je ściągnąć z robota i pracować nimi trzymając w dłoni. Przy takiej ręcznej obsłudze chirurg miał możliwość uruchomienia wszystkich stopni swobody narzędzia, dzięki czemu ruchliwość końcówki zabranej robotowi była znacznie większa niż osiągalna dla narzędzi laparoskopowych mechanicznych. To była bardzo istotna zaleta, bo rzadko całą operację robi się samym tylko robotem.



Roboty Robin Heart zostały wypróbowane w operacjach na zwierzętach w Centrum Medycyny Doświadczalnej Śląskiego Uniwersytetu Medycznego w latach 2009-2010 (operacja pęcherzyka żółciowego, pomostowania naczyń wieńcowych i operacja naprawcza zastawek serca). Sprawdziły się w tych doświadczeniach i potwierdziły słuszność założeń, na których oparta była ich konstrukcja.

Powiedzmy kilka słów o tej rdzenie polskiej konstrukcji.

Ogólna zasada działania jest podobna do tej, jaką zastosowano w opisywanych wcześniej robotach ZEUS i w używanych dziś powszechnie robotach Da Vinci. Robin Heart ma także oddzielną konsolę chirurga i oddzielną część manipulacyjną, wykonującą laparoskopowo operacje w ciele pacjenta. Część manipulacyjna posiada trzy ramiona. Dwa zewnętrzne są ramionami narzędziowymi i mogą zastąpić przy stole asystenta trzymającego dwa narzędzia i przygotowującego pole operacji. Środkowe ramię wyposażone jest w innowacyjne rozwiązanie: platformę narzędziową z dwoma narzędziami chirurga



głównego i toru wizyjnego (endoskopu). Dzięki temu niektóre operację zamiast trzech chirurgów, może wykonywać jeden specjalista z konsoli Robin Heart Shell.

Może doczekamy się tego, że roboty chirurgiczne Robin Heart staną się polską specjalnością eksportową? Osobiście bardzo bym tego życzył profesorowi Nawratowi i całemu zespołowi FRK!

## Roboty chirurgiczne. Część 8 – roboty chirurgiczne jako biznes



Do obejrzenia i posłuchania na <https://youtu.be/8tEL5wVzXIQ>

Omawiając w tej serii felietonów tematykę robotów chirurgicznych rozważaliśmy różne związane z nimi zagadnienia techniczne i medyczne, nie dotykając (w zasadzie) aspektów ekonomicznych. Tymczasem budowa i sprzedaż robotów chirurgicznych to także biznes – i o tym aspekcie chcę dzisiaj trochę porozmawiać.

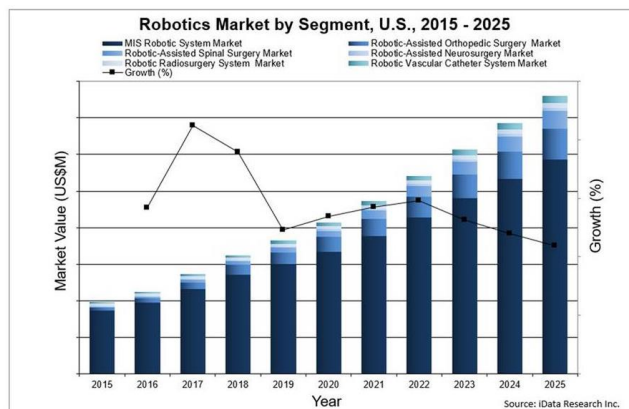
Robot chirurgiczny nie jest urządzeniem tanim. Oczywiście cena zależy od konfiguracji i wyposażenia, ale tytułem przykładu mogę odnotować, że pod koniec 2018 roku robota da Vinci zakupiło Wielkopolskie Centrum Onkologii w Poznaniu płacąc 14 milionów zł. A jednak na całym świecie kupuje się ich i instaluje coraz więcej. Na dzień 31 marca 2019 roku zanotowano, że na świecie pracowało już 5.669 robotów chirurgicznych, co oznacza wzrost o 11% w stosunku do danych z końca I kwartału 2018r roku, kiedy tych urządzeń było dokładnie 5.114 . W całym 2019 roku wykonano 7,2 mln operacji z użyciem robotów, co można obrazowo zilustrować stwierdzając, że co 26 sekund odbywała się gdzieś na świecie operacja z użyciem robota.



Nic dziwnego, że firma Intuitive Surgical, producent robotów da Vinci w 2019 r. zarobiła 4.478,5 mln USD. To dużo, ale ważniejsze jest, że to oznacza 20% wzrostu w stosunku do 2018 r., kiedy to odnotowano 3.724,2 mln USD przychodów. Co więcej, przychody tej firmy ostatnio, w I kwartale 2020 r. wyniosły 1.100 mln USD co oznacza wzrost o 13% w porównaniu do wyniku w pierwszym kwartale 2019 r., mimo pandemii koronawirusa.

A może ten wzrost jest skutkiem tej epidemii? Użycie robota gwarantuje wszak bezpieczny dystans między lekarzem i pacjentem!

Warto odnotować, że obecnie w ponad 40% ten duży przychód jest pozyskiwany na rynku amerykańskim, niemniej to się zmienia dzięki otwierającym się na systemy robotyczne kolejnym krajom. Warto w tym miejscu 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.

Ogólnie prognozy dla firmy produkującej roboty chirurgiczne są bardzo optymistyczne. Firma konsultingowa Global Market Insights opublikowała prognozę, że w ciągu najbliższych 6 lat wartość rynku chirurgii robotycznej będzie rosła w tempie niemal 25% rocznie. Jeśli prognozy się sprawdzą, to w 2025 sprzedaż ta osiągnie poziom 24 mld USD. Jest się z czego cieszyć!



Warto zwrócić uwagę na jeszcze jeden czynnik:

Główne źródło przychodów firmy wcale nie pochodzi z tego, że buduje ona i sprzedaje nowe roboty. Aż 54% dochodów przynoszą narzędzia i akcesoria, które użytkownicy robotów muszą zakupywać do każdej wykonywanej operacji. Wspominałem we wcześniejszych artykułach, że narzędzia, które robot wprowadza do wnętrza ciała operowanego pacjenta, nie mogą być potem użyte do operacji innego człowieka ze względu na brak możliwości ich skutecznej sterylizacji. Jednocześnie szczelny system patentów firmy Intuitive Surgical powoduje, że żadne rozwiązania zastępcze („Polak potrafi...”) nie wchodzi w rachubę. W efekcie każdy robot, niezależnie od tego, gdzie pracuje, napędza zyski macierzystej firmie. A są to spore zyski – w ubiegłym roku było to aż 2.408,2 mln USD.

Jak widać w fascynującym świecie robotów chirurgicznych są trzy obszary: medycyny, techniki i ekonomii. Z coraz wyraźniejszą dominacją tej ostatniej!

## Roboty chirurgiczne. Część 9 – nic nie jest doskonałe!

W siedmiu wcześniejszych felietonach opisywałem rozwój techniki robotów chirurgicznych, podkreślając ich zalety. Przyszła pora na to, żeby pokazać także „drugą stronę medalu”.

Niestety, roboty chirurgiczne przyczyniły się też do pewnej liczby nieudanych operacji. Nie był to duży odsetek, ale zaalarmował on amerykańską Agencję Żywności i Leków, która w 2000 roku dopuściła roboty Da Vinci do powszechnego stosowania, a w 2013 roku powołała specjalną komisję, która badała wszystkie przypadki nieudanych operacji, w których uczestniczył robot. Stwierdzono, że 2007 roku zdarzył się wypadek przebicia jelita podczas zabiegu chirurgicznego śledziony, w wyniku czego doszło do zakażenia i pacjent zmarł. W 2013 roku analizowano przypadek śmierci kobiety podczas hysterotomii (chirurg przeciął naczynie krwionośne i nie zauważył krwotoku).

Najszerszym echem odbił się ostatni wypadek. Pięć lat temu w Wielkiej Brytanii po raz pierwszy przeprowadzono operację zastawki serca przy pomocy robota **Da Vinci**. Pacjent zmarł. Śledztwo wykazało, że podczas zabiegu dopuszczono się wielu zaniedbań, ale największe błędy popełniła sama maszyna.

To miał być rutynowy zabieg zastawki mitralnej serca, ale jednocześnie pierwszy tego typu w Wielkiej Brytanii, podczas którego to robot miał operować. Pacjent, 69-letni **Stephen Pettitt**,

emerytowany nauczyciel muzyki, operowany był w szpitalu w Newcastle w 2015 roku. Kilka dni po zabiegu zmarł.

Komisja lekarska ustaliła, że chirurg, który sterował pracą robota, **Sukumaran Nair**, nie był do tego odpowiednio przygotowany. Jego wiedza opierała się na tym, że obserwował podobne operacje w USA oraz w Holandii. Sam nigdy ich nie wykonywał. Przed zabiegiem sterowanie robotem podczas operacji ćwiczył wyłącznie na komputerowym symulatorze. Na szkolenia przygotowujące nie miał kiedy chodzić, ponieważ w tym samym czasie miał do przeprowadzenia inne operacje.

Również asystujący mu zespół, który został specjalnie ściągnięty z zagranicy, nie miał odpowiednich uprawnień. Co więcej, jego członkowie wyszli z sali operacyjnej jeszcze zanim zabieg się zakończył. Reasumując, cała ekipa, która prowadziła zabieg, tak naprawdę dopiero na tym pacjencie uczyła się, jak operować za pomocą robota. Niestety – ta nauka miała wysoką cenę.

Podczas zabiegu pojawiły się poważne komplikacje, a na sali operacyjnej panował totalny chaos. Zespół nie był w stanie się ze sobą komunikować, ponieważ operujący robot bardzo hałasował, przez co lekarze praktycznie nie słyszeli się nawzajem. W pewnym momencie jeden z asystujących przy operacji lekarzy został przez przypadek uderzony ramieniem robota.

W trakcie operacji uszkodzona została aorta, z której krew poląła się na obiektyw kamery robota, ograniczając tym samym widoczność. Dodatkowo maszyna, już po skończonym zabiegu, źle założyła szwy pacjentowi.

Pacjent oficjalnie zmarł z powodu komplikacji po operacji zastawki. Jednak do jego śmierci przyczyniło się również to, że zabieg przeprowadzony był przy pomocy robota. Zdaniem ekspertów mężczyzna przeżyłby operację, gdyby wykonywał ją człowiek.

Na szczęście był to ostatni taki przypadek i od pięciu lat nie znalazłem ani jednego doniesienia o operacji nieudanej z winy robota. Ale tak, jak napisałem w tytule: Nic nie jest doskonałe. Robot chirurgiczny nie jest niestety wyjątkiem od tej reguły...

**Robotyka urologiczna**

Zygmunt Dobrowolski, Ryszard Tadeusiewicz

AGH

AKA Akademicki Ośrodek Wydawniczy  
im. Profesora Stanisława Topolińskiego

Książka sfinansowana przez AGH w ramach wypełnienia zobowiązania  
na kierunku Inżynieria Biomedyczna

**Prof. dr hab. med. Zygmunt Dobrowolski**

Kierownik Katedry Urologii Collegium Medicum Uniwersytetu Jagiellońskiego. Absolwent AM w Krakowie 1966, doktorat 1974, habilitacja 1985, tytuł naukowy 2002. Pracownik Collegium Medicum Uniwersytetu Jagiellońskiego. Specjalista chirurgii od 1973 roku, specjalista urologii od 1977. Autor 450 publikacji. Honoraria honoratuzi 64 lekarzy, promotor 15 doktoratów, Wykładowca European School of Urology i European School of Oncology. Członek Polskiego Towarzystwa Urologicznego (PTU), Europejskiego Towarzystwa Urologicznego (EAU), Amerykańskiego Towarzystwa Urologicznego (AUA), czeskiego Stowarzyszenia Urologicznego (CZU), czeskiego Stowarzyszenia PTU do Zarzadki (CZSUZ) 2001, członek korespondent Międzynarodowego Towarzystwa Urologicznego, Czeskiej Komisji Stowarzyszenia Urologicznego, Czeskiej Zarządku (CEOC) Central European Cooperative Oncology Group (2000-2015), Krajowy koordynator dla badań i leczenia raka w ramach EORTC i European Organization for Research and Treatment of Cancer (EORTC-EO-2000-2007). Konsultant Regionalny w zakresie urologii 1996-1999. Sta w województwie małopolskim, województwie i podkarpackim. Konsultant Województw w dziedzinie urologii (sta województwa małopolskiego 2000-2007). Autor i organizator Międzynarodowych Galopich Spotkań Urologicznych poświęconych z dziedzinie Edukacji Europejskiej Szkoły Urologii (1997-2006). Autor i organizator Żywych spotkań urologicznych w Zakopanem (1998-2008). Autor i organizator I Kongresu Urologów Nowogrodzkiej i Polskich 2010. Odznaczony medalem Pro Patria et Scientia oraz Statuetką Orta Biologii i Statuetką Prometheusa za działalność charytatywną. [zygmunt\\_1.dobrowolski@uj.edu.pl](mailto:zygmunt_1.dobrowolski@uj.edu.pl)

**Prof. zw. dr hab. med. Ryszard Tadeusiewicz**

Prezes Krakowskiego Oddziału PAN, kierownik Katedry Automatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH. Absolwent AGH 1971, doktorat 1975, habilitacja 1990, tytuł naukowy 1996. Inżynier, automatyk, biocybernetyk. W latach 1996-1998 minister ds. Nauki AGH, od 21.01.1999 Rektor AGH, wybrany na kolejną kadencję (1999-2002) oraz na trzecią kadencję na kadencję (2000-2005); przewodniczący Komitetu Rektorskiego Polaków Uczelni Technicznych (1999-2005), wiceprzewodniczący Kolegium Rektorskiego Polaków Uczelni Technicznych (1999-2005), członek prezydium KRSU w kadencji (1999-2002). Doktor Honoris Causa 12 uczelni krajowych i zagranicznych. Jest autorem ponad 950 prac naukowych i ponad 80 monografi książkowych. Członek PAN i PAU. Stał w akademiach zagranicznych: stowa Prizickich (Akademii Ecclesiasticae), Złoty (Moskwa), Partecipatio Merito Junii Academiae Europaeae Scientiarum Artium Litterarumque (Peters), Fellow of World Academy of Art and Science (Wenecja), Europeanizer, FEAN, Stowarz. Honor Member of IEEE (San Francisco), professional member of ACM (New York), member of SPIE (Stanbridge). [www.tadeusiewicz.pl](http://www.tadeusiewicz.pl)