

# Roboty równoległe do precyzyjnej manipulacji w operacjach chirurgicznych

Krzysztof Mianowski, Filip Gruca, Jakub Grzonkowski, Jan Makulec

Politechnika Warszawska, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa, ul. Nowowiejska 24, 00-665 Warszawa

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wybrane zagadnienia poruszające problematykę robotów równoległych w zastosowaniu do precyzyjnej manipulacji w zabiegach operacji chirurgicznych. Zreferowano krótko stan nowych, opracowywanych współcześnie technik operacyjnych wymagających dużej dokładności i efektywności prowadzonych zabiegów zapewniających bardzo małą inwazyjność operacji. Na podstawie dostępnej literatury i materiałów internetowych przedstawiono szereg nowatorskich rozwiązań konstrukcji manipulatorów równoległych spełniających kryteria kwalifikujące do prowadzenia operacji chirurgicznych. Szczególną uwagę zwrócono na interdyscyplinarność tej dziedziny badań.

**Słowa kluczowe:** robot równoległy, chirurgiczny robot operacyjny, precyzyjna manipulacja zdalna

## 1. Wprowadzenie

Na przestrzeni wieków ludzkość była świadkiem wielu przełomowych odkryć i zmian w dziedzinie medycyny. Co chwila wymyślano nowe remedia na trapiące nas choroby i dolegliwości. Również wiele zabiegów oraz procedur medycznych zostało znacznie usprawnionych. To wszystko za sprawą możliwości, jakie daje nieustanny rozwój nowych dziedzin technologii, takich jak fotonika<sup>1</sup> lub robotyka. Dzięki nim mamy do dyspozycji wiele narzędzi ułatwiających pracę lekarzy, diagnostów a nawet fizjoterapeutów. W ostatnich latach można zaobserwować znaczną zmianę w podejściu do procedur chirurgicznych, związaną z ogólnym rozwojem techniki i technologii. Dotyczy to bardzo dynamicznego postępu w zakresie automatyzacji wybranych procedur chirurgicznych oraz robotyzacji całych zabiegów chirurgicznych wykonywanych metodami operacyjnymi.

Czytelnikowi należy wyjaśnić, że w artykule będziemy korzystać z pojęcia „robot chirurgiczny”, podczas gdy większość tego typu urządzeń stosowanych w praktyce medycznej nie jest robotami (które z definicji mają określony poziom autonomii działania i sztucznej inteligencji) lecz tzw. telemanipulatorami. Z punktu widzenia prawa aktualnie nie jest możliwe, aby sztuczne urządzenie techniczne – robot – mogło odpowiadać za

1 Dziedzina nauki zajmująca się manipulacją cząstkami światła (fotonami). Obszary zastosowań to technologie laserowe, światłowodowe, diagnostykę medyczną i wiele innych.

### Autor korespondujący:

Krzysztof Mianowski, krzysztof.mianowski@pw.edu.pl

### Artykuł recenzowany

nadesłany 13.12.2024 r., przyjęty do druku 05.02.2025 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 4.0 Int.

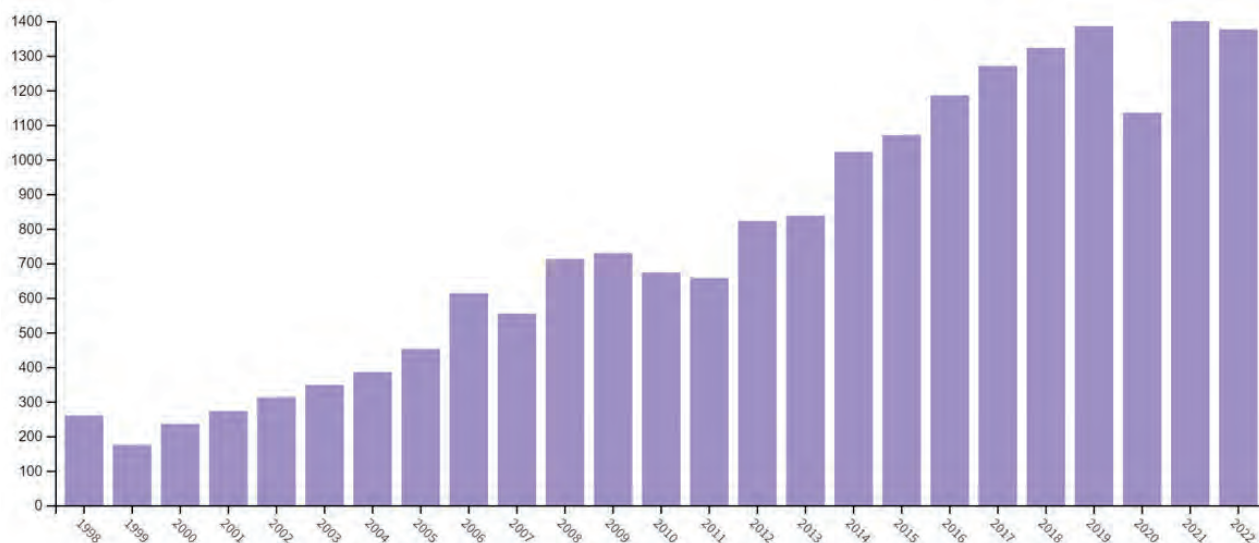
zdrowie lub życie pacjenta. Za leczenie pacjenta, w tym metodami operacyjnymi musi odpowiadać człowiek-lekarz. Robot chirurgiczny jest tylko narzędziem w dyspozycji lekarza, który dzięki tej technice może wykonać operację w sposób bardziej komfortowy dla pacjenta i dla lekarza. Lekarz wspomagając się robotem podczas operacji, dysponuje bardziej precyzyjnym i znacznie bezpieczniejszym narzędziem, niż stosowane dotychczas skalpel, szczypce, nożyczki chirurgiczne, czy igłotrzymak.

W tym procesie od pewnego czasu pojawił się nowy trend stosowania w konstrukcjach mechanizmów robotów chirurgicznych, tzw. manipulatorów równoległych<sup>2</sup>. Okazało się to „strzałem w dziesiątkę” i obecnie to ten trend zaczyna wieść prym w rozwoju robotów chirurgicznych. Rozwiązania z manipulatorami równoległymi cieszą się coraz większym zainteresowaniem ze strony środowisk naukowych i akademickich. Dobitnie świadczy o tym statystyka obrazująca liczbę opublikowanych artykułów ze słowem kluczowym „parallel robot” na przestrzeni lat (rys. 1).

Nic więc dziwnego, że z roku na rok wzrasta liczba potencjalnych zastosowań tych konstrukcji. Na przestrzeni lat starano się wykorzystać unikalne cechy manipulatorów równoległych w medycynie – dysponują one bowiem bardzo dużym poziomem precyzji, co jest niezwykle pożądaną cechą w tej dziedzinie. W artykule przeglądowym pochylimy się bliżej nad problematyką zastosowania manipulatorów równoległych w medycynie. Przeanalizujemy najnowsze rozwiązania, koncepty i ich możliwe kierunki rozwoju.

W literaturze przedmiotu przyjęły się dwa podstawowe pojęcia dotyczące zagadnienia takich konstrukcji: *parallel robot* – robot równoległy oraz *parallel manipulator* – manipulator równoległy. Według normy ISO 8383 Robotics – Vocabulary, definicji 4.14.7 – parallel robot, pod pojęciem robota równoległego rozumie się robota z układem manipulacyjnym zawierającym w swojej struk-

2 Są to roboty charakteryzujące się tym, że w swojej konstrukcji zawierają kilka tzw. kończyn mechanicznych połączonych jednocześnie („równoległe”) z podstawą manipulatora i jego końcowym elementem ruchomym tworząc w ten sposób między sobą kilka zamkniętych pętli kinematycznych.



Rys. 1. Liczba powstałych artykułów ze słowem kluczowym „parallel robot” w latach 1998–2022 [30]

Fig. 1. Number of articles with the keyword „parallel robot” in the years 1998–2022 [30]

turze kinematycznej zamknięte pętle kinematyczne. Oznacza to m.in., że obciążenie zewnętrzne działające na chwytak manipulatora jest równoważone jednocześnie przez kilka jego tzw. kończyn, co z jednej strony znacznie zmniejsza ich naprężenia wewnętrzne a z drugiej strony znacznie poprawia dokładność realizacji trajektorii zadanej.

## 2. Przegląd technologii i konceptów dostępnych na rynku

Na przestrzeni ostatnich lat byliśmy świadkami nieustannej robotyzacji chirurgii. Tendencja ta wciąż nabiera rozpędu i co chwila na rynku pojawiają się nowe rozwiązania. Dlatego na wstępie warto dokonać przeglądu gotowych rozwiązań robotów chirurgicznych zawierających zastosowane rozwiązania manipulatorów równoległych. Wiedza ta pomoże nam lepiej zrozumieć istniejące trendy, którymi kieruje się postępujący rozwój tej technologii. Dodatkowo ułatwi nam możliwość przewidzenia, czego należy się spodziewać w przyszłości.

W czasie ostatnich 30–40 lat w medycynie postępuje systematyczny rozwój i upowszechnienie operacji chirurgicznych, tzw. małoinwazyjnych. Przyczynia się do tego ogólny postęp techniki, opracowywanie nowych materiałów, w tym kompozytowych i nowych technologii, np. cięcia promieniem lasera, cięcia strugą cieczy, również z dodatkiem ścierniwa, wydruku 3D z tworzyw sztucznych i materiałów metalicznych, plazmowego natryskowego pokrywania powierzchni protez wszczepialnych hydroksyapatytem. Jednocześnie są opracowywane i rozwijane nowoczesne narzędzia projektowe typu CAD (ang. *Computer Aided Design*), narzędzia wspomagania technologii CAM (ang. *Computer Aided Manufacturing*) oraz narzędzia wspomagania prac inżynierskich CAE (ang. *Computer Aided Engineering*) pozwalające na komputerowe, w pełni zintegrowane projektowanie narzędzi chirurgicznych, urządzeń medycznych, m.in. robotów–telemanipulatorów do wspomagania operacji chirurgicznych typu małoinwazyjnego. Takie narzędzia projektowe pozwalają na powstawanie nowych koncepcji i wzorów projektowych oraz umożliwiają zupełnie nowe, innowacyjne podejście do całego procesu wdrażania nowych technik i technologii operacyjnych, umożliwiając przeprowadzanie operacji chirurgicznych według zupełnie nowych reguł z korzyścią dla pacjenta i personelu medycznego. Systematycznie wprowadza się do sal operacyjnych nowe rozwiązania techniczne, jak obrazowody w układach wizyjnych zawierające włókna światłowodowe, miniaturowe

wysokorozdzielcze kamery cyfrowe, żarówki ksenonowe, co przyczynia się do poprawy jakości wewnętrznego obrazu zamkniętego (nieotwartego) pola operacyjnego.

Stosowanie w medycynie różnego rodzaju tzw. inteligentnych urządzeń, w tym manipulatorów i robotów (np. sterowanych głosem) systematycznie rośnie. Zwiększa to wygodę i pozwala na znaczne usprawnienie pracy lekarza oraz pozwala na zmniejszenie kosztów procedur medycznych. Roboty w medycynie są głównie używane do:

- asystowania w przebiegu zabiegów chirurgicznych,
- pomocniczej obsługi szpitalnej,
- w rehabilitacji prowadzonej według powtarzalnych programów,
- wspomagania różnych procedur medycznych.

Stosowanie opracowywanych współcześnie nowoczesnych technik operacyjnych gwarantuje dużą dokładność i efektywność prowadzonych zabiegów oraz bardzo niską inwazyjność operacji. Wymaga to przeprowadzenia odpowiedniej ukierunkowanej diagnostyki, zaplanowania przebiegu operacji z zastosowaniem nowoczesnego sprzętu, sprawnego przeprowadzenia zabiegu i odpowiednio dobranej terapii rehabilitacyjnej. Początkiem takich zmian w sposobie podejścia do operacji chirurgicznych było wprowadzenie komputerowo wspomaganych technik uzyskiwania i przetwarzania obrazów, korzystania z komputerowych baz wiedzy na bieżąco i w sposób interaktywny oraz korzystanie z komputerowo wspomaganych technik operacyjnych z udziałem sterowania narzędziami za pomocą mikroprocesorowych układów sterowania. Oczywiście wymaga to nowoczesnego podejścia do kształcenia personelu medycznego w tym w zakresie korzystania z technik komputerowych. Potrzebna jest znajomość technik komputerowych, sposobu obsługi urządzeń peryferyjnych komputera, zasad korzystania z komputera w zastosowaniu do obsługi technik medycznych, oraz umiejętność czytania wyników analiz opracowywanych przez algorytm komputerowe.

Od blisko czterdziestu lat do prowadzenia operacji chirurgicznych metodami małoinwazyjnymi (tj. z zastosowaniem narzędzi laparoskopowych) stosuje się mechaniczne manipulatory wspomagające proces manipulowania tymi narzędziami. Dla zwiększenia ich funkcjonalności, szczególnie przy prowadzeniu zabiegów, które wymagają wysokiej precyzji i odpowiedniego poziomu ruchliwości końcówki narzędzia operującego wewnątrz ciała pacjenta, zostały opracowane nowe narzędzia typu laparoskopowego, o znacznie większym poziomie skomplikowania układów mechanicznych i często znacznie bardziej rozbudowanych,

w celu łatwiejszego operowania z użyciem napędu elektrycznego. Wymagają one jednak odpowiedniego sterowania. Pozwala to na odejście lekarza-operatora od stołu operacyjnego i prowadzenie przez niego operacji nawet ze znacznej odległości. Można sobie wyobrazić prowadzenie operacji chirurgicznej w trakcie działań krzysosowych, gdy operowany pacjent po urazie znajduje się na stole operacyjnym w strefie stanowiącej zagrożenie dla lekarza, podczas gdy operujący go lekarz zajmuje miejsce w strefie bezpiecznej siedząc wygodnie przy konsoli operatorskiej pozwalającej na zdalne prowadzenie zabiegu ratującego życie pacjenta.

W Politechnice Warszawskiej pierwsze próby opracowania wysoko dokładnych mechanizmów układów manipulacyjnych do zastosowania w chirurgii laparoskopowej narządów wewnętrznych (m.in. operacji mózgu) podjęto z końcem lat 90. XX w. [13–23]. Opracowane konstrukcje charakteryzują się dużą sztywnością, wysokim poziomem powtarzalności i dokładności pozycjonowania, a w szczególności prostotą rozwiązań konstrukcyjnych. Dalszy rozwój tych konstrukcji był realizowany w ramach współpracy z Fundacją Rozwoju Kardiologii [14, 15, 17–19].

Prowadzenie operacji chirurgicznej na organach ciała pacjenta polega na jego ulokowaniu w miejscu odpowiednio przygotowanym i zabezpieczonym przed działaniami szkodliwych drobno-ustrojów w pozycji pozwalającej na prowadzenie zabiegu, tj. w szpitalnej sali operacyjnej, na stole lub siedzisku operacyjnym. Typowa operacja chirurgiczna polega na odpowiednim rozcięciu zewnętrznej powłoki ciała pacjenta, dotarciu w sposób niezagrażający zdrowiu i życiu pacjenta do miejsca operowanego schorzenia, przeprowadzeniu bezpiecznego zabiegu wycięcia fragmentu narządu objętego zmianą chorobową, zabezpieczeniu miejsca ingerencji przed zakażeniem i wyciekami płynów ustrojowych przez tzw. zespolenie lub zszycie, co może wymagać jednoczesnego zewnętrznego podtrzymywania tkanki miękkiej, a następnie wyprowadzeniu użytych narzędzi na zewnątrz. Typowa operacja chirurgiczna polega na zszyciu powłok zewnętrznych ciała. Można powiedzieć, że operacja chirurgiczna składa się z kilku czynności elementarnych:

- cięcie,
- trzymanie, podtrzymywanie,
- szycie,

przy czym wykonujący te czynności lekarz-operator musi na bieżąco mieć możliwość obserwacji całego pola operacyjnego, konieczne jest więc widzenie lub tzw. sztuczne widzenie.

W przypadku zastosowania robota operacyjnego – telemanipulatora – konieczne jest stosowanie komputerowych metod tworzenia obrazów (ang. *imaging methods*) oraz przesyłanie obrazów na odległość. Są one stosowane zarówno w procesach diagnostycznych, jak i w procedurach operacyjnych. Służą do tego endoskopy i laparoskopy, umożliwiające lekarzowi odpowiednio dokładny bezpośredni lub pośredni ogląd zewnętrznych powierzchni organów wewnętrznych w sposób pozwalający na postawienie diagnozy bieżącej, a także śledzenie postępujących efektów prowadzenia operacji. Aktualnie w czasie operacji lekarz może korzystać z innych metod obrazowania, jak tomografia komputerowa i rezonans magnetyczny. Wymaga to jednak odrębnego podejścia.

Aktualnie medycyna operacyjna coraz szerzej korzysta z osiągnięć współczesnej techniki – z wykorzystaniem Internetu możliwe jest przesyłanie obrazów na duże odległości, również w czasie rzeczywistym, co pozwala na rozszerzenie konsylium lekarskiego o specjalistów w celu skorzystania z wiedzy większego gremium medycznego o szerszym spektrum zainteresowań, co może mieć też duże znaczenie dydaktyczne.

Możliwość wykorzystania algorytmów sztucznej inteligencji AI (ang. *Artificial Intelligence*) do analizy trójwymiarowych obrazów wnętrza ciała uzyskanych metodami tomograficznymi, przez ich porównywanie z obrazami standardowymi stworzonymi w opracowanych tymi samymi metodami nowoczesnych atlasach ana-

tomicznych, stanowi cenne narzędzie diagnostyczne. Diagnoza przed operacją okazuje się znacznie szybsza, co pozwala na lepsze planowanie z zastosowaniem skuteczniejszych metod leczenia, co pozwala na skrócenie procedur i w efekcie daje lepsze rokowania szybszego powrotu do zdrowia.

Roboty medyczne do wspomaganie operacji chirurgicznych stosowane podczas teleoperacji, mogą być sterowane bez użycia rąk, np. głosem albo w sposób automatyczny, szczególnie w zakresie precyzyjnych czynności powtarzalnych. Niezależnie od tego mogą być używane jako tzw. lokalizatory zarówno pasywne, jak i częściowo lub całkowicie aktywne.

Każda operacja chirurgiczna z zastosowaniem robota, jak i operacja wykonywana zdalnie przez chirurga z jednoczesną obserwacją pola pracy za pomocą kamery laparoskopowej lub endoskopowej przebiega w trzech fazach:

- planowanie przedoperacyjne, w trakcie którego chirurg planuje operację z wykorzystaniem trójwymiarowych obrazów uzyskanych za pomocą kamery stereowizyjnej, porównując uzyskane obrazy z odpowiednim trójwymiarowym modelem komputerowym. W tej fazie ustala się optymalną strategię planowanej operacji i rejestruje się ją w pamięci komputera centralnego oraz przygotowuje się programy sterujące pracą robota,
- planowanie operacji z użyciem robota (telemanipulatora), pierwszą czynnością prowadzonej operacji jest synchronizacja i kalibracja układów pomiarowych i wykonawczych robota względem pacjenta, tj. charakterystycznych anatomicznych punktów operacyjnych, ustalenie pola pracy robota i ustalenie właściwych układów odniesienia,
- zasadniczy zabieg operacyjny, robot realizuje zaplanowane zadania pod nadzorem chirurga, w trakcie zabiegu procedury operacyjne są interaktywnie kontrolowane za pomocą odpowiednich układów sensorycznych. Przebieg operacji jest bez udziału chirurga prowadzącego, obserwowany i korygowany w sposób automatyczny przez odpowiednie procedury komputera głównego, nad bezpieczeństwem pacjenta czuwa komputerowy system bezpieczeństwa oraz zespół operacyjny.

Należy podkreślić, że operacja jest prowadzona przez lekarza-operatora, który w zależności od jej przebiegu podejmuje decyzje co do dalszej kontynuacji z zastosowaniem robota, a w razie potrzeby przerywa ją i kontynuuje pracę metodami klasycznymi.

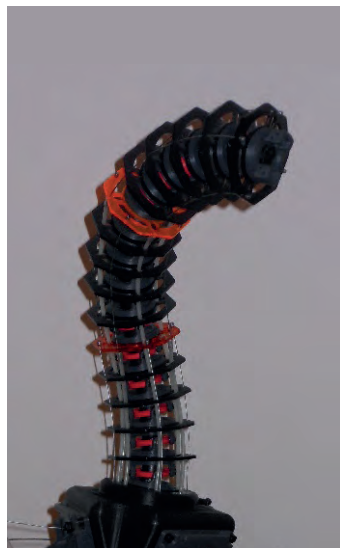
## 2.1. Nowa generacja robotów chirurgicznych z manipulatorami równoległymi

Ostatnie dziesięciolecie było niezwykle owocne w dokonania z zakresu rozwoju medycyny i robotyki medycznej. Jednym z najnowszych dokonań, łączących te dwie gałęzie jest opracowanie tzw. robotów równoległych o strukturze ciągłej (ang. *Parallel Continuum Robot*). Roboty takie składają się z segmentów oraz odpowiadających im aktuatorów, wprawiających segmenty w ruch. W grupie ciągłych robotów równoległych wyróżnia się [1]:

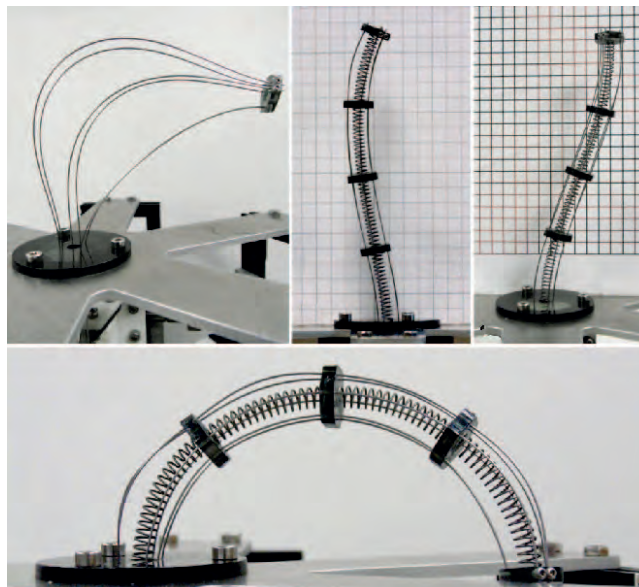
- Roboty elastyczne ciągle (ang. *Tendon-actuated PCR*),
- Roboty szkieletowe (ang. *Multibackbone PCR*),
- Roboty z rurą koncentryczną (ang. *Concentric Tube PCR*),
- Roboty napędzane sterowane magnetycznie w sposób bezpośredni,
- Roboty miękkie (gładkie o łagodnych ciągłych przejściach geometrycznych kształtu struktury) (ang. *Soft robot*)<sup>3</sup>.

Na rys. 2 przedstawiono przykład rozwiązania robota szkieletowego napędzanego z podstawy za pomocą systemu linek

<sup>3</sup> Działające dzięki wykorzystaniu mięśni pneumatycznych. W takiej konstrukcji aktuator jest jednocześnie segmentem robota. Charakterem swoich ruchów, oraz sposobemysterowania mogą przypominać trąbę słonia.



**Rys. 2. Przykład rozwiązania robota szkieletowego typu Multibackbone PCR – rozwiązanie własne**  
 Fig. 2. Example of a Multibackbone PCR skeleton robot solution – the own solution



**Rys. 3. Przykład robota o konstrukcji elastycznej ciągłej – prezentacja właściwości co do zakresu ruchów [2]**  
 Fig. 3. An example of a robot with a flexible continuous structure – presentation of properties regarding the range of movements [2]

prowadzonych w osłonach i mocowanych do wybranych segmentów struktury.

Wszystkie odznaczają się nieosiąganym dotąd tzw. poziomem zręczności (ang. *dexterity*) co do zakresu obsługiwanych czynności operacyjnych, korzystnym dla prowadzenia zabiegów chirurgicznych, również robotów równoległych. Co ciekawe, wszystkie wymienione manipulatory można w pewnym zakresie rozpatrywać jako połączone ze sobą, tj. zwiokrotnione platformy Stewarta<sup>4</sup>. Takie podejście do modelowania ich kinematyki zostało opisane w [2].

Nie jest to rozwiązanie idealne. Do budowy robota (rys. 3) trzeba zastosować cienkie, odkształcalne pręty lub struny, natomiast w trakcie wykonywania ruchów wszystkie części manipulatora narażone są na występowanie dużych, nieliniowych odkształceń. Wobec tego zjawisko to nie może zostać pominięte w procesie modelowania jego właściwości, jak i w procesie sterowania pracą manipulatora. Należy również zadbać, aby poszczególne segmenty składowe robota pozostawały względem siebie w kontrolowanych stanach lub konfiguracjach, np. by pewne charakterystyczne punkty platform nie zmieniały odległości od siebie podczas ruchu. Zapewnia się to m.in. przez implementację centralnie umieszczonej sprężyny rozprężnej, której zadaniem jest odpowiednie rozstawienie zamocowanych na pręcie centralnym (lince) kolejnych segmentów konstrukcji. Warto zaznaczyć, że sprężyna z reguły nie bierze aktywnego udziału we wspomaganiu ruchów czynnych (sterowanych) manipulatora.

Zastosowanie w konstrukcji manipulatora wielu segmentów, stanowiących swoiste prowadnice dla prętów odpowiedzialnych za ruch ogólny robota, znacząco zwiększa jego obszar roboczy, przy czym zachowane są wszystkie niezbędne do obsługi czynności operacyjnych zewnętrzne stopnie swobody (jest ich tu sześć, a ruch ogólny może być wykonywany w sposób redundantny, tj. na różne sposoby tak, jakby robot miał więcej stopni swobody). Ponadto konstrukcja całego manipulatora umożliwia jego odkształcalność – takie cechy są szczególnie pożądane podczas wykonywania zabiegów chirurgicznych, w których wymagana

jest wysoka precyzja i minimalna inwazyjność ze strony układu mechanicznego robota.

Konstrukcja robota z centralnie umieszczoną sprężyną zapewnia dodatkowo odpowiedni poziom naprężenia „ścięgien” (linek) robota, co pozwala na unikanie kłopotliwego w eksploatacji i trudnego do modelowania zjawiska wyboczenia. Zjawisko to mogłoby powodować problemy z zadawaniem pozycji. Jednak przez wprowadzanie zadawanych sił naprężenia wewnętrznego linek sterujących, możliwe jest kontrolowanie sztywności zewnętrznej konstrukcji mechanicznej manipulatora, co znacznie polepsza jego właściwości użytkowe. Podczas wprowadzania manipulatora do obszaru pracy przez odpowiedni dukt rurowy, można luzując linki sterujące wprowadzić manipulator w stan „zwióczenia”, co usprawnia ten proces. Natomiast po wprowadzeniu końcówki manipulatora w obszar pracy można go odpowiednio usztywnić napinając linki, co pozwala na precyzyjniejszą manipulację i zwiększa dokładność procesów operacyjnych oraz polepsza kontrolę operatora nad prowadzonym zabiegiem.

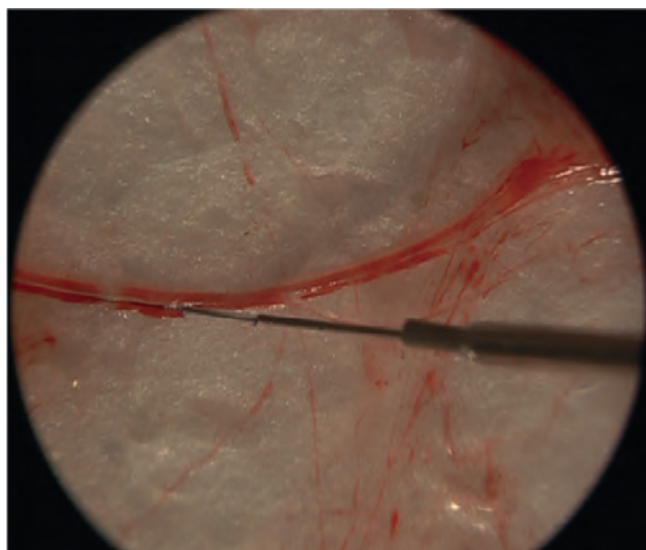
## 2.2. Przesuwanie granic precyzji

Pierwsze wzmianki o operacjach gałki ocznej pochodzą już sprzed szóstego stulecia przed naszą erą. W hinduskim Sanskrycie znajdują się zapiski o wykonywaniu operacji usunięcia zaćmy przez nakłuwanie soczewki oka igłą. Ówczesne realia nie pozwalały jednak na całkowite naprawienie wzroku pacjenta, z uwagi na wymiary używanego narzędzia oraz obiektywnie niski poziom higieny przy wykonywaniu operacji. Na przestrzeni wieków wiele się w tej materii zmieniło [11].

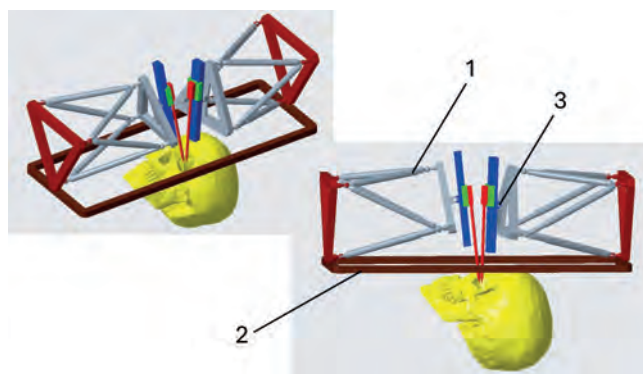
Jedną z najbardziej wymagających dziedzin chirurgii jest chirurgia siatkówki oka. Konieczna tutaj jest bardzo duża precyzja ruchu – roboty potrafiące wykonywać operacje oka są niemalże wyłącznie robotami równoległymi.

Obecnie przedmiotem najnowszych badań w dziedzinie okulistyki jest udoskonalanie konstrukcji robota opracowanego na uniwersytecie Vanderbilta w Nashville (USA). Robot ten przeznaczony jest do operowania zakrzepów gałązek żyły środkowej siatkówki. Jest to przypadek, w którym w wyniku miażdżycy lub zapalenia naczyń dochodzi do powstania zakrzepów w żyłach siatkówkowych. Objawami są: niewyraźne widzenie lub utrata widzenia w pewnym obszarze oka. Do dwóch znanych obecnie metod operacji takiego schorzenia należy witrektomia oraz kaniulacja mikronaczynkowa [5–7]. Celem naukowców z Nashville było

<sup>4</sup> Platforma Stewarta – manipulator równoległy składający się z sześciu liniowych siłowników napędowych (hydraulicznych lub elektrycznych), które są w odpowiedni sposób zamocowane przegubowo zarówno do platformy podstawy manipulatora, jak i do jego platformy ruchomej [29] tworząc między sobą zamkniętą pętlę kinematyczną.



Rys. 4. Stent umieszczony w jednej z żył siatkówki oka [3]  
 Fig. 4. Stent placed in one of the retinal veins [3]



Rys. 5. Konstrukcja robota zaproponowana przez Uniwersytet Vanderbilta: 1 – platforma Stewarta o sześciu stopniach swobody, 2 – mechanizm pozycjonujący o dwóch stopniach swobody, 3 – robot stentujący o trzech stopniach swobody, koncepcja własna inspirowana przez [5]  
 Fig. 5. Robot design proposed by Vanderbilt University: 1 – Stewart platform with six degrees of freedom, 2 – positioning mechanism with two degrees of freedom, 3 – stent robot with three degrees of freedom, according to [5]

opracowanie metody minimalizującej ryzyko powikłań, polegającej na precyzyjnym umieszczeniu stentów w żyłkach siatkówki oka pacjenta. Zabieg ten został przedstawiony na rys. 4.

Nietrudno zauważyć, że wszystkie trzy dostępne rozwiązania należą do zabiegów niezwykle trudnych (witrektomia bywa nazywana „operacją ostatniej szansy”) – aby operować żyły siatkówki należy dostać się do nich, nie uszkadzając rogówki, tęczówki oraz soczewki.

Zrobotyzowane stanowisko opracowane na Uniwersytecie Vanderbilta składa się z dwóch manipulatorów typu platforma Stewarta, zamontowanych naprzeciwko siebie na wspólnej okrągłej podstawie. Napędem tych platform są silowniki elektryczne liniowe z przekładniami śrubowymi. Na platformach ruchomych manipulatorów podstawowych zamocowane są dodatkowe mechanizmy pozycjonujące o dwóch stopniach swobody, wstępnie ustalające pozycje robotów stentujących. Te z kolei mają po trzy stopnie swobody – dwa obroty względem przecinających się w jednym punkcie osi prostopadłych, oraz przesuw wzdłuż linii przechodzącej przez ten punkt. Jest to zatem rozwiązanie umożliwiające ruch we współrzędnych kulistych. Roboty stentujące odpowiedzialne są za wprowadzanie stentów w gałkę oczną oraz wykonywanie delikatnych ruchów końcówek operacyjnych robotów pozycjonujących stenty. Konstrukcja całego robota została pokazana w postaci wizualizacji 3D (rys. 5).

Opisana konfiguracja ma zapewnić możliwość jednoczesnego wprowadzenia do oka pacjenta dwóch narzędzi lub wzierników. Operację wykonuje dwóch lekarzy jednocześnie, kontrolując przypisane im zestawy manipulatorów [4].

Wstępne badania opisywanego robota wykazały, że dokładność pozycjonowania stentu w gałce ocznej może wynosić nawet poniżej 5 μm, co stanowi poziom precyzji odpowiedni do obsługi założonych i wymaganych zadań [3]. Warto zaznaczyć, że wynikowa efektywna i całkowita dokładność operowania narzędziem chirurgicznym utrzymuje się na poziomie ≈ 10 μm. Obecnie trwają prace nad inteligentnymi algorytmami sterowania robotem z wykorzystaniem sztucznej inteligencji (AI), które mają wspomagać pracę chirurgów i ułatwiać im obsługę robotów i wykonywanie operacji za pomocą tego systemu [5].

### 2.3. Robot chirurgiczny da Vinci

Robot chirurgiczny da Vinci jest robotem typu master-slave (robotem-teleoperatorem), w którym część sterowniczą



Rys. 6. Robot chirurgiczny da Vinci w układzie 4-ramiennym [25]  
 Fig. 6. da Vinci surgical robot in a 4-arm system [25]

(master) stanowi konsola z interfejsem użytkownika, natomiast częścią wykonawczą (slave) jest robot o czterech ramionach interaktywnych – każdy o siedmiu stopniach swobody. Każde z czterech ramion robota wygląda z zewnątrz jak manipulator szeregowy, jednak budowa wewnętrzna tego ramienia ma strukturę manipulatora równoległego. Oprócz podstawowych komponentów (konsoli i robota) system da Vinci wyposażony jest w najbardziej zaawansowaną technikę obrazowania 3D w kolorze oraz specjalistyczne robotyczne narzędzia chirurgiczne EndoWrist. Dzięki układowi wizyjnemu złożonemu z dwóch kamer, chirurg ma wrażenie trójwymiarowości. Możliwe są też zmiany parametrów obrazu (powiększenie, kontrast).

Stosowane narzędzia EndoWrist zostały skonstruowane tak, aby imitowały umiejętności ludzkiej dłoni wraz z nadgarstkiem. Mają do pięciu stopni swobody każde i ich końcówka może zgiąć się pod kątem 90°, a w przypadku operacji tylnej części serca wprowadza się je z przodu pacjenta a następnie można ją obrócić

nawet o około 180°. Dzięki układom redukcji drżenia rąk oraz kompensacji gwałtownych ruchów chirurga system robota niweluje możliwość wystąpienia błędów ludzkich. Za pomocą robota można wykonywać operacje z zastosowaniem precyzyjnych minimalnych cięć, co znacznie zmniejsza czas rekonwalescencji, utratę krwi i prawdopodobieństwo komplikacji pooperacyjnych. Warto dodać, że aby operacja była udana, należy stosować szybkie i niezawodne połączenie sieciowe (minimum 10 Mb/s) o małym czasie opóźnienia transmisji (poniżej 200 ms).

## 2.4. Chirurgia teleoperacyjna

Dla pacjenta, który dowiedział się, że jest poważnie chory i konieczna jest interwencja chirurgiczna, ważnymi aspektami w szukaniu pomocy jest możliwość szybkiego jej otrzymania, spodziewana dobra skuteczność leczenia i oczekiwana wysoka niezawodność zabiegu. W przypadku konieczności wykonania trudnych i skomplikowanych operacji ważnych narządów, takich jak serce czy mózg ograniczona jest liczba specjalistów, których doświadczenie pozwala na podjęcie się takiego zadania. Przedstawiciele ochrony zdrowia narzekają na przeciągający się czas oczekiwania pacjentów w kolejkach. W momencie, gdy pacjent potrzebuje wykonania natychmiastowego zabiegu, a stan jego zdrowia nie pozwala na przewiezienie go na większą odległość, z pomocą może przyjść zabieg wykonywany metodą teleoperacji.

Zabieg na odległość wykonuje się z zastosowaniem robota chirurgicznego – teleoperatora. Do najbardziej znanych systemów należą ZEUS (którym wykonano operację przez Ocean Atlantycki Robot ZEUS niestety został już wycofany z rynku) i da Vinci. Wystarczy, aby pacjenta przewieźć do ośrodka leczniczego posiadającego ambulatorium lub salę operacyjną wyposażoną w system z odpowiednim robotem chirurgicznym, odpowiednio przygotowaną i utrzymaną w gotowości przez personel medyczny. Co więcej, nie jest tu wymagana obecność fizyczna chirurga specjalizującego się w danym typie operacji. Lekarz-operator może się znajdować w innym ośrodku (w dowolnym miejscu na świecie), wyposażonym w system zdalnego zadawania ruchu robota (master) i połączenie internetowe z odpowiednio szybkim łączem. Wystarczy, że lekarz zostanie odpowiednio wcześniej powiadomiony i połączy się w zadanym czasie z robotem operacyjnym (slave) w celu zdalnego instruowania personelu pomocniczego pracującego w sali z pacjentem i przeprowadzenia samej operacji przez zdalne sterowanie robotem za pomocą manetek systemu master. Takie rozwiązanie może umożliwić najlepszym specjalistom przeprowadzanie skomplikowanych operacji nawet z własnego domu, praktycznie bez konieczności jego opuszczania, np. w trakcie groźnej epidemii. Aby polepszyć komunikację między chirurgiem a asystującymi



Rys. 7. Testy aparatury do wykonywania teleoperacji da Vinci na sali operacyjnej [26]  
Fig. 7. Tests of da Vinci teleoperation equipment in the operating room [26]



Rys. 8. Robot ZEUS w układzie wykorzystywanym w Operacji Lindbergh [27]

Fig. 8. ZEUS robot in the system used in Operation Lindbergh [27]

mu lekarzami przebywającymi na miejscu wykonywania zabiegu, wykorzystuje się audio oraz wideo komunikację.

Pojawiają się informacje o możliwym wykorzystaniu technologii 5G do usprawnienia tego procesu. Ma ona znacznie przyspieszyć przesyłanie danych na duże odległości, a tym samym znacznie zniwelować opóźnienia czasu reakcji robota oraz zwiększyć jego dokładność, a tym samym precyzję wykonywanych zabiegów.

Pierwszy tego typu międzykontynentalny zabieg odbył się w 2001 r. Został ochrzczony nazwą „Operacja Lindbergh”. Polegała ona na usunięciu pęcherzyka żółciowego 68-letniej pacjentce znajdującej się w Strasburgu. Odległość stanowiska operacyjnego typu (master) obsługiwane przez doktora Jacques’a Marseaux (rys. 8), a chirurga wykonującego ten zabieg, znajdującego się w tym samym czasie w Nowym Jorku, wynosiła 6230 km. Do tego pionierskiego zabiegu chirurgicznego wykorzystano system ZEUS, zbudowany z trzech ramion kontrolowanych (sterowanych zadajnikami) przez lekarza z konsoli głównej i systemu czujników/sensorów przesyłających informacje zwrotne do pulpitu użytkownika. Z powodu fuzji dwóch firm Computer Motion produkującą robota ZEUS z konkurencyjnym producentem Intuitive Surgical produkującym robota da Vinci, zaprzestano produkcję robota ZEUS a od 2003 r. rozpoczęto sukcesywne ulepszanie systemu z robotem da Vinci.

## 3. Kierunki rozwoju manipulatorów równoległych w medycynie

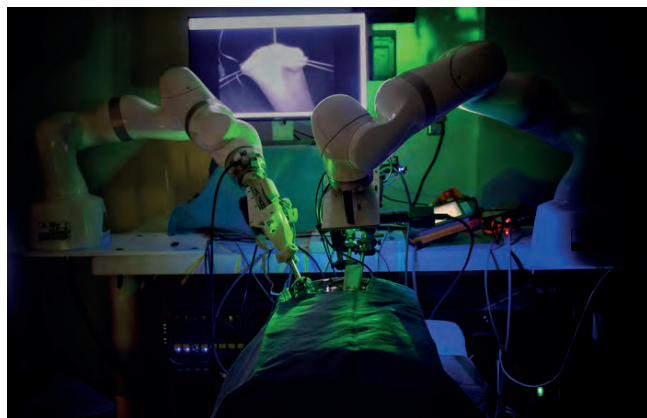
Przytoczone wcześniej przykłady wyraźnie dowodzą, że automatyzacja medycyny stwarza chirurgom nowe możliwości w zakresie precyzji, dostępności wysokospecjalistycznych procedur oraz sposobów dostarczania opieki zdrowotnej. Wprowadzone technologie pozwalają sukcesywnie podnosić jakość usług medycznych i wносить je na nowe wyższe poziomy. Nadal jest wiele obszarów, w których możliwy jest dalszy rozwój i poprawa działania urządzeń. Mimo dynamicznej automatyzacji i robotyzacji, znaczna część zabiegów chirurgicznych nadal wykonywana jest metodami tradycyjnymi. Teraz przyjrzymy się możliwym kierunkom rozwoju tych zaawansowanych systemów w kontekście medycyny, analizując zarówno ich obecne zastosowania, jak i perspektywy przyszłych innowacji.

### 3.1. Autonomiczność systemów

Jak powszechnie wiadomo „leniwość” w jego nieco innym znaczeniu określane jest jako jeden z motorów postępu. Coraz częściej dąży się do tego, aby systemy automatyki coraz wydatniej wspierały nasze działania lub całkowicie nas w nich wyręczały. Nie dziwi więc fakt, iż na przestrzeni ostatnich lat wyraźnie widać rosnącą tendencję do nadawania systemom automatyki coraz większej autonomii w działaniu. Nie inaczej ma się sprawa w chirurgii. Tutaj jednak, przez wzgląd na uwarunkowania prawne i niechęć ludzi do powierzenia swojego zdrowia lub życia w ręce maszyny, zmiany zwykle następowały znacznie wolniej, niż w innych dziedzinach.

Do zdefiniowania stopnia autonomiczności w automatyce, powszechnie stosuje się 10-stopniową skalę Sheridana (ang. *Sheridan's Levels of Autonomous Behavior*) [12]. Jej twórcą był Thomas B. Sheridan, pionier badań nad interakcją człowieka i maszyny. Systemy charakteryzujące się poziomem najniższym nie mają żadnej autonomii i mogą wykonywać jedynie wcześniej zaprogramowane czynności (sterowanie ręczne). Do niedawna były to najbardziej powszechne rozwiązania. W ostatnim czasie są powoli zastępowane przez systemy będące na najwyższym poziomie autonomiczności – tutaj robot na podstawie oceny sytuacji sam wybiera cel oraz środki dążenia do niego. W chirurgii robotycznej mimo wielu przeszkód, przeprowadza się coraz więcej eksperymentów mających na celu wdrażanie takich technologii. Szandarowym przykładem są udane zabiegi chirurgiczne wykonane metodą teleoperacji. Zyskały one dużą popularność mimo wykorzystania robota będącego zaledwie na trzecim poziomie autonomiczności. Inżynierowie pracują obecnie nad przeprowadzaniem całkowicie autonomicznych operacji tego typu.

Opracowany przez zespół z Johns Hopkins University inteligentny autonomiczny robot tkankowy STAR (ang. *Smart Tissue Autonomous Robot*) w 2022 r. przeprowadził całkowicie autonomiczną operację laparoskopową na tkance zwierzęcej [9]. Testując laparoskopię manualną i wspomaganą robotem operację zespolenia jelit świńskich, naukowcy odkryli, że autonomiczna operacja oferowana przez system STAR była dokładniejsza, a zatem lepsza. Cechą wyróżniającą jest to, że jest to pierwszy system robotyczny, który planuje, dostosowuje i wykonuje operację na tkankach miękkich przy minimalnej ingerencji człowieka.



Rys. 9. Robot STAR przeprowadzający całkowicie autonomiczną operację laparoskopową [9]

Fig. 9. STAR robot performing a completely autonomous laparoscopic surgery [9]

Jest kwestią czasu, kiedy zabiegi wymagające dużej precyzji, np. operacje siatkówki oka będą wykonywane przez autonomiczne roboty-manipulatory, w tym roboty równoległe. W tym przypadku bardzo pomocne mogą okazać się równoległe rozwijające się technologie, takie jak widzenie maszynowe oraz sztuczna inteligencja (AI). Zabiegi te mogłyby być wykonywane z niespotykaną dotąd dokładnością. Uprzednio zbadana, za pomocą widzenia maszynowego, siatkówka oka mogłaby być operowana przez bardzo precyzyjne manipulatory równoległe. Dodatkowo zapewniając dużą bazę danych z już wykonanych zabiegów można by nieustannie poprawiać ich skuteczność przy użyciu AI. Precyzyjnie wykonane w ten sposób scenariusze operacji, w połączeniu z dużą dokładnością i stabilnością manipulatorów równoległych mogą odznaczać się bardzo wysoką skutecznością i niskim ryzykiem powikłań.

Dodatkowym atutem autonomicznych robotów równoległych jest 100-procentowa powtarzalność wykonywanych zabiegów. Przez wzgląd na tę cechę, pewnym jest, że technologie te zdo-

minują w przyszłości te gałęzie chirurgii, gdzie przeprowadza się szereg prostych zabiegów, takich jak np. usuwanie kamieni nerkowych czy enukleacja prostaty, czyli minimalnie-inwazyjne zmniejszenie objętości gruczołu z użyciem lasera. Rocznie przeprowadza się wiele takich operacji i dziedziny te, przez wzgląd na wciąż rosnące kolejki wymagają automatyzacji. Autonomiczne roboty równoległe, z łatwością wykonają szereg takich zabiegów, nie tracąc przy tym precyzji. Pomoże to znacznie zmniejszyć ryzyko powikłań poważnych i niepotrzebnych urazów, które w tym obszarze zdarzają się niestety dość często. Dodatkowo każdy przypadek może zostać zarejestrowany i w odpowiednim czasie odtworzony do celów szkoleniowych, w celu poprawy jakości wykonywanych zabiegów.

Widać więc szereg niewątpliwych zalet, jakie oferują nam manipulatory równoległe w połączeniu z innymi technologiami, co sprawi, że prędzej czy później bezpieczniejszym rozwiązaniem będzie poddanie się zabiegom z ich udziałem niż tradycyjna operacja chirurgiczna, nawet jeśli skalpel będzie trzymał najbardziej wykwalifikowany specjalista. Bo przecież nic nie stoi na przeszkodzie, aby jego doświadczenie i wypracowane techniki zostały wkomponowane w precyzyjne modele AI, a jego ręce zostały zastąpione przez manipulatory równoległe wykonujące cięcia z dokładnością na poziomie nanometrów. Taka przyszłość jest bliższa niż nam się wydaje.

## 3.2. Duża precyzja

Oprócz doskonalenia algorytmów sterowania, wart uwagi jest również rozwój rozwiązań konstrukcyjnych. W tym obszarze należy rozważyć wykorzystanie materiałów inteligentnych, minimalizację stref niejednoznaczności geometrycznej (mechanicznej, tzw. luzów), zastosowanie hybrydowych układów napędowych oraz implementację systemów pomiarowych nowej generacji.

### 3.2.1. Materiały inteligentne

W konstrukcji robotów równoległych można z powodzeniem stosować różne materiały inteligentne, które mają zdolność do reakcji na zmienne warunki otoczenia lub na odpowiednie sterowanie zewnętrzne. Materiały te oferują nowe możliwości, pozwalając na tworzenie bardziej elastycznych, tj. adaptacyjnych i bardziej efektywnych konstrukcji nowej generacji.

Jedną z grup materiałów inteligentnych stanowią polimery elektroaktywne. Są to elastyczne materiały, które ulegają deformacji pod wpływem zmian pola elektrycznego. Użycie odpowiednich impulsów elektrycznych może powodować skurcze, wydłużenia lub skręty tych materiałów. Cecha ta może zostać wykorzystana, gdy użycie standardowych aktuatorów jest utrudnione lub niemożliwe, np. w razie konieczności sterowania końcówką robota w ograniczonej przestrzeni gałki ocznej pacjenta.

Inną grupę materiałów inteligentnych stanowią materiały piezoelektryczne. Ich cechą szczególną jest zdolność elektrostrykcji czyli możliwość zastosowania do pracy jako aktuator (siłownik zmiany położenia) i jednocześnie czujnik/sensor do pomiaru jego stanu. Sterowanie aktuatorami elektrostrykcyjnymi należy do zadań relatywnie nieskomplikowanych, natomiast generowane ruchy są powtarzalne i odznaczają się bardzo dużą precyzją. W zależności od użytej konfiguracji zmiana sterowania o 1 V może powodować odkształcenie rzędu 0,29 nm. Dodatkową zaletą stanowi również możliwość osiągania znaczących prędkości i przyspieszeń ruchu elementu wykonawczego takiego aktuatora.

### 3.2.2. Struktury podatne

Jednym z kluczowych aspektów wykorzystania struktur podatnych w budowie manipulatorów równoległych jest ich znaczący wpływ na zwiększenie precyzji adaptacji mechanicznej tych urządzeń. Elastyczność, charakterystyczna dla struktur podatnych, pozwala na skuteczne tłumienie drgań oraz absorpcję energii impulsów sił zewnętrznych, co w rezultacie prowadzi

do wyższej precyzji w wykonywaniu obsługiwanych zadań. Elastyczność elementów konstrukcyjnych sprawia, że manipulatory są bardziej odporne na niewielkie błędy operatora, oraz niejednorodności w strukturze, co jest szczególnie istotne w przypadku długotrwałych operacji wymagających stałej, wysokiej precyzji. W zastosowaniach medycznych czy przemysłowej precyzji, gdzie nawet niewielkie odchylenia mogą mieć istotne znaczenie, struktury podatne przyczyniają się do eliminacji błędów wynikających z niedoskonałości konstrukcyjnych czy nieuniknionych wibracji środowiska pracy.

### 3.2.3. Hybrydowe układy napędowe

Hybrydowe systemy napędowe, łączące różne technologie, oferują unikalne możliwości adaptacji do różnorodnych zadań, jednocześnie utrzymując wysoką precyzję ruchów.

Integracja silników elektrycznych, pneumatycznych i hydraulicznych pozwala na optymalne wykorzystanie ich zalet w zależności od wymagań konkretnego zadania. Silniki elektryczne zapewniają szybkie i precyzyjne ruchy, silniki pneumatyczne oferują elastyczność, natomiast silniki hydrauliczne zapewniają wysoki poziom sił napędowych. Połączenie tych trzech typów napędu ułatwi manipulatorowi równoległemu adaptację w warunkach dynamicznych w celu odpowiednio szybkiego dostosowywania swoich właściwości do zmieniających się warunków pracy, co znacznie rozszerzy zakres jego potencjalnych zastosowań.

### 3.2.4. Systemy pomiarowe

Sensory o wysokiej rozdzielczości, takie jak enkodery optyczne czy technologie LiDAR, umożliwiają precyzyjne śledzenie ruchów manipulatora w czasie rzeczywistym. Integracja pozyskanych w ten sposób danych z zaawansowanymi algorytmami sterowania pozwala na skuteczniejsze kompensowanie wszelkich zakłóceń.

Równocześnie rozwój sztucznej inteligencji we wspomaganie systemów pomiarowych/sterujących i kontrolnych pozwala na przystosowawcze (adaptacyjne), samoczynne uczenie się systemu robota-manipulatora, co przekłada się m.in. na dynamiczną optymalizację trajektorii ruchów. Wykorzystanie technologii sztucznej wizji otwiera nowe możliwości, umożliwiając manipulatorowi równoległemu interakcję ze środowiskiem w sposób bardziej intuicyjny, dokładny i adekwatny do stawianych wymagań.

## 3.3. Aspekty edukacyjne

Edukacja przez zastosowanie manipulatorów równoległych w medycynie stanowi istotny element szkolenia przyszłych specjalistów, w tym chirurgów, technologów medycznych i innych pracowników związanych z obszarem opieki zdrowotnej. Zastosowanie układów wizyjnych i komunikacji werbalnej w operacyjnych systemach zrobotyzowanych pozwala na rejestrację i/lub strumieniowy przesył sygnałów do sal, w których odbywają się konsylia specjalistów lub sal konferencyjnych i/lub dydaktycznych, w tym nawet na duże odległości. Sygnały te mogą być wykorzystane podczas konsultacji medycznych operatora w czasie operacji, prezentacji przebiegu i wyników operacji na konferencjach, jak też do wykorzystania w dydaktyce do kształcenia nowej kadry oraz w ocenie okresowej lekarza-operatora i ocenie jakości wykonywanych zabiegów w danej jednostce opieki zdrowotnej.

### 3.3.1. Chirurgia minimalnie inwazyjna

Manipulatory równoległe są często wykorzystywane do prowadzenia procedur chirurgii minimalnie inwazyjnej, takich jak laparoscopia czy torakoscopia. Studenci medycyny uczą się obsługi i sterowania takimi systemami, co umożliwia precyzyjne wykonywanie zabiegów przy minimalnych nacięciach skórnych.

### 3.3.2. Symulacje medyczne

Manipulatory równoległe są integralną częścią symulacji medycznych, które pozwalają na realistyczne odtwarzanie warunków chirurgicznych. Studenci praktykują na modelach anatomicznych, symulatorach cielesnych lub w tzw. środowisku wirtualnym, co pomaga im rozwijać umiejętności praktyczne bez konieczności bezpośredniego kontaktu z pacjentem, szczególnie na etapie początkowym przygotowania do zawodu.

### 3.3.3. Telechirurgia

Edukacja w zakresie telechirurgii przy użyciu manipulatorów równoległych pozwala na zdalne wykonywanie procedur chirurgicznych. Studenci uczą się obsługi zdalnych systemów chirurgicznych, co może być przydatne w przypadku prowadzenia operacji na odległość.

### 3.3.4. Zastosowanie Wirtualnej Rzeczywistości

Integracja manipulatorów równoległych z technologią wirtualnej rzeczywistości umożliwia tworzenie realistycznych scenariuszy edukacyjnych. Studenci mogą trenować na wirtualnych pacjentach, co pozwala na bezpieczne i wielokrotne powtarzanie różnych procedur.

### 3.3.5. Badania nad poprawą procedur medycznych

Edukacja przy wykorzystaniu manipulatorów równoległych stwarza studentom możliwość uczestniczenia w badaniach nad innowacyjnymi rozwiązaniami medycznymi. Studenci mogą angażować się w rozwijanie nowych technologii, które mają potencjał poprawy skuteczności i bezpieczeństwa procedur medycznych.

### 3.3.6. Współpraca z przemysłem medycznym

Dzięki współpracy z firmami produkującymi manipulatory równoległe, studenci mają dostęp do najnowocześniejszych rozwiązań stosowanych w medycynie. To pozwala na lepsze zrozumienie aktualnych trendów i standardów w branży. Warto tu zaznaczyć, że zastosowanie robotów w medycynie przyczyni się do szybszego i efektywniejszego wdrażania nowych technik i technologii oraz opracowania zupełnie nowych metod leczenia, np. nieznanych dotychczas chorób.

Niezależnie od tego komputeryzacja systemów organizacji pracy w medycynie pozwoli na bardziej efektywne prowadzenie statystyk wykonywanych zabiegów, co może się przyczynić do racjonalizacji planowania pracy jednostek medycznych oraz do predykcji możliwych zachorowań i przebiegu chorób w wytypowanej populacji objętej prowadzeniem takich statystyk.

## 4. Chirurgia 4.0 w Polsce i na świecie

W dzisiejszych czasach technologia robotów chirurgicznych stanowi istotny element postępu w dziedzinie medycyny. Firmy, takie jak Synektik, będące dystrybutorem systemów da Vinci w Polsce, dostarczają cenne dane dotyczące rozprzestrzenienia tych zaawansowanych technologii. Analiza danych wskazuje, że Polska pozostaje w tyle w zakresie nasycenia robotami chirurgicznymi, w porównaniu do niektórych krajów Europy Zachodniej.

Według danych Synektika, Polska charakteryzuje się relatywnie niższym nasyceniem robotami chirurgicznymi na tle liczby mieszkańców w porównaniu do dużych krajów Zachodniej Europy. Kraje te wykazują 4–6-krotnie wyższe nasycenie systemami automatyki chirurgicznej, co stanowi istotny wskaźnik rozwoju technologicznego w dziedzinie medycyny.

Wyniki analizy ilustrują, że choć Polska uczestniczy aktywnie w adaptacji nowoczesnych technologii medycznych, to nadal istnieje znacząca przepaść w dostępie do robotów chirurgicznych w porównaniu z krajami Zachodniej Europy. Wpływ na to



stanowiąc mogą różnice w budżetach zdrowotnych, dostępności finansowania na innowacje medyczne oraz specyficzne wybory strategiczne w planowaniu inwestycji w służbie zdrowia. Robotyczne systemy chirurgiczne należą bowiem do kosztownych rozwiązań. Robot da Vinci kosztuje obecnie 2,5 mln dolarów. Poza wysoką ceną zakupu, należy pamiętać również o zapewnieniu właściwego serwisowania jednostek.

Liczba robotów da Vinci w wybranych krajach Europy na dzień 1 czerwca 2023 r. wynosi:

- Francja – 340,
- Niemcy – 330,
- Włochy – 180,
- Wielka Brytania – 160,
- Hiszpania + Portugalia – 110,
- Szwecja – 60,
- Czechy – 17,
- Słowacja – 4.

Systemy da Vinci są jednymi z najbardziej popularnych i powszechnie używanych na całym świecie. Kluczową rolę w tej dominacji odgrywa firma Intuitive Surgical Inc., której innowacyjne podejście do robotów chirurgicznych zrewolucjonizowało sposób, w jaki lekarze przeprowadzają operacje. Jednak wraz z wygasaniem patentów od 2017 r., rynek ten stał się bardziej otwarty na konkurencję i nowe technologie.

Obecnie na świecie działa ponad 8 tysięcy systemów automatyki chirurgicznej, z czego około 570 zlokalizowanych jest w Japonii. Tam dominuje nie tylko obecność systemów da Vinci,

ale także ponad 35 systemów Hinotori oraz pionierskie systemy Hugo, tworząc w ten sposób zróżnicowane środowisko technologiczne. W Korei Południowej 69 systemów da Vinci obsługuje 51 szpitali, podczas gdy w Indiach przeszło 50 robotów chirurgicznych rewolucjonizuje podejście do medycyny.

#### 4.1. Rozwój w podziale na regiony

Rozwój automatyzacji chirurgii w Polsce nie jest jednolity i wykazuje zróżnicowanie między poszczególnymi regionami kraju. Szczególnie różnice w rozwoju pokazują tabele 1 i 2.

Pierwsze ośrodki wyposażone w roboty chirurgiczne pojawiły się we Wrocławiu i Toruniu, stanowiąc pionierskie inwestycje w tej dziedzinie. Kolejne etapy rozwoju związane były z warszawskimi placówkami medycznymi, w tym szpitalami prywatnymi.

Bydgoszcz, Poznań, Kraków, Białystok i Łódź dołączyły do grona miast, które wzbogaciły swoją ofertę medyczną o roboty chirurgiczne. Od końca 2019 r. nastąpił dynamiczny rozwój Mazowsza jako centralnego obszaru skupiającego wysoką liczbę ośrodków korzystających z technologii automatyki chirurgicznej.

Robotyzacja chirurgii nie ogranicza się już jedynie do głównych miast, wzbogacając swoją dostępność także w mniejszych miejscowościach, takich jak Wieliszew, Siedlce, Otwock, Międzylesie czy Piaseczno. Dodatkowo, od 2020 r. większe warszawskie szpitale, takie jak Wojskowy Instytut Medyczny, Centralny Szpital Kliniczny MSWiA czy Uniwersyteckie Centrum Kliniczne WUM, włączyły możliwość przeprowadzenia pewnych zabiegów przez roboty do swoich ofert. Mimo wcześniejszego dynamicznego

Tab. 1. Liczba operacji robotowych w 2020 r. w poszczególnych województwach [8]

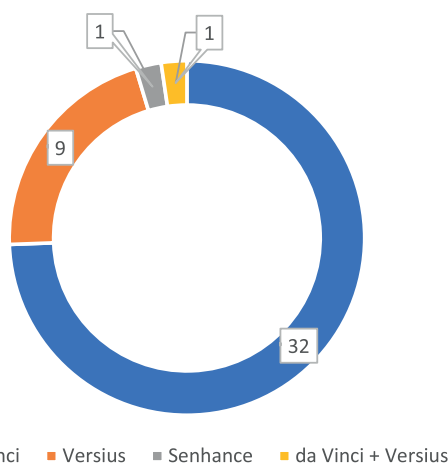
Tab. 1. Number of robotic operations in 2020 in individual voivodeships [8]

Województwo	Liczba operacji robotowych	Liczba zabiegów na 100 000 mieszkańców	Liczba mieszkańców (tys.)
mazowieckie	871	15,8	5513
kujawsko-pomorskie	206	10,2	2018
podlaskie	109	9,5	1149
małopolskie	220	6,4	3430
wielkopolskie	152	4,3	3500
zachodniopomorskie	66	4,0	1650
łódzkie	51	2,1	2395
dolnośląskie	51	1,8	2898
pomorskie	18	0,8	2359
lubuskie	0	0,0	985
lubelskie	0	0,0	2038
podkarpackie	0	0,0	2086
śląskie	0	0,0	4376
świętokrzyskie	0	0,0	1188
opolskie	0	0,0	949
warmińsko-mazurskie	0	0,0	1375
Polska	1744	4,6	37 909

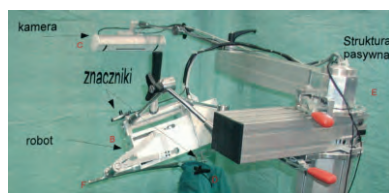
Tab. 2. Liczba operacji robotowych w 2022 r. w poszczególnych województwach [8]

Tab. 2. Number of robotic operations in 2022 in individual voivodeships [8]

Województwo	Liczba operacji robotowych	Liczba zabiegów na 100 000 mieszkańców	Liczba mieszkańców (tys.)
mazowieckie	2062	37,4	5513
lubuskie	255	25,9	985
zachodniopomorskie	280	17,0	1650
podlaskie	163	14,2	1149
lubelskie	228	11,2	2038
kujawsko-pomorskie	205	10,2	2018
podkarpackie	206	9,9	2086
śląskie	411	9,4	4376
pomorskie	188	8,0	2359
wielkopolskie	272	7,8	3500
łódzkie	173	7,2	2395
świętokrzyskie	63	5,3	1188
małopolskie	176	5,1	3430
dolnośląskie	152	5,2	2898
opolskie	10	1,1	949
warmińsko-mazurskie	0	0,0	1375
Polska	4844	12,8	37 909



**Rys. 10. Systemy automatki medycznej stosowane przez szpitale w Polsce (2022 r.) [8]**  
 Fig. 10. Types of medical automation systems used by hospitals in Poland (2022) [8]



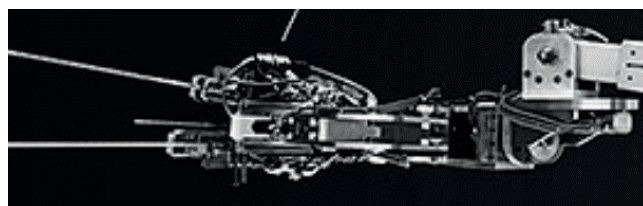
**Rys. 11. Koncept polskiego medycznego teleoperatora stacjonarnego [28]**  
 Fig. 11. The concept of a Polish medical stationary teleoperator [28]

nego rozwoju, od 2021 r. żadna nowa placówka na Mazowszu nie zrobotyzowała uruchamianej sali chirurgicznej. Choć warszawski Szpital św. Elżbiety, będący własnością LUXMED, otworzył pracownię z nowym systemem da Vinci w kwietniu 2023 r., to należy podkreślić, że jest to kontynuacja wcześniej przejętego ośrodka, który działał od 2018 r. jako Carolina Medical Center/Hifu Clinic.

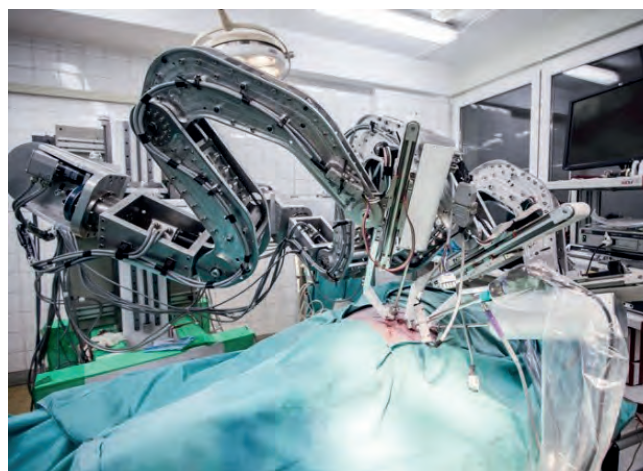
Mimo nie najlepszych statystyk robotyzacji polskiego sektora chirurgii, na naszym podwórku powstają liczne koncepty oraz prototypy takich urządzeń. Jednym z nich był projekt teleoperatora stacjonarnego NeuroGuide (rys. 11). Jego zadaniem było wykonywanie precyzyjnych otworów w kręgosłupie pacjenta przystosowanych do montażu implantów usztywniających. Wiadomo, że urazy dwóch pierwszych kręgów (dźwignacza i obrotnika), na skutek wypadków samochodowych lub zmian chorobowych, są bardzo powszechne. Zabiegi leczące tę dolegliwość charakteryzują się dość długim czasem oczekiwania na wolne terminy oraz wysokim ryzykiem dla pacjenta. Urządzenia mogące znacznie przyspieszyć oraz usprawnić ten proces są bardzo pożądane. Polski koncept został nawet skutecznie przetestowany na odpowiednio spreparowanych tkankach ludzkich. Dodatkowo był przystosowany do wykonywania operacji zdalnych. Z powodu braku zainteresowania tematem polskiej ochrony zdrowia oraz braku funduszy, badania nad projektem były kontynuowane za granicą. Aktualnie los tego konceptu nie jest nam znany. Jego los podzieliło wiele podobnych innowacyjnych projektów. Dlatego obecnie Polska nie jest gotowa na przyjęcie innowacyjnych robotów w medycynie

## 4.2. Robin Heart

W kontekście dynamicznego rozwoju, pojawia się też projekt polskiego robota chirurgicznego o nazwie RobIn Heart. Nazwa ta odnosi się do słów „rob in heart”, co tłumaczy się jako



**Rys. 12. Schemat konstrukcyjny platformy narzędziowej [10]**  
 Fig. 12. Construction diagram of the tool platform [10]



**Rys. 13. RobIn Heart mc2 – widok ogólny [10]**  
 Fig. 13. RobIn Heart mc2 – general view [10]

„robot w sercu”. Projekt jest opracowywany głównie jako urządzenie robotowe do wykonywania zabiegów w trakcie operacji na sercu i stanowi innowacyjne podejście do rozwiązań robotów chirurgicznych, które będą wykorzystywane również w innych dziedzinach medycyny.

Dr Zbigniew Nawrat, lider projektu, wyjaśnia, że nazwa RobIn Heart nie tylko odnosi się do „robotu w sercu”, ale również ma skojarzenia z postacią Robin Hooda. Projekt ten zakładał stworzenie robota, który byłby nie tylko zaawansowany technologicznie, ale również dostępny finansowo dla szerokiego grona użytkowników, w przeciwieństwie do kosztownego systemu da Vinci.

Dr Nawrat podkreśla, że zespół rozpoczął pracę od jednego z najtrudniejszych obszarów – chirurgii serca. Pierwsza teleoperacja, czyli operacja na odległość miała miejsce w 2010 r. w Fundacji Rozwoju Kardiochirurgii w Zabrzju. Wykorzystano prototyp robota RobIn Heart, za którego konsolą zajęła miejsce kardiochirurg pani doktor medycyny Joanna Śliwka. Operacja na sztucznym szkielecie z umieszczonym w klatce piersiowej świńskim sercem odbyła się na odległości około 30 km. Opóźnienie wyniosło niecałe 280 ms, przy czym do transmisji sygnałów sterujących wykorzystano łącze radiowe.

Robot chirurgiczny RobIn Heart (RiH) mc<sup>2</sup> stanowi innowacyjną próbę rozwiązania współczesnych problemów w dziedzinie chirurgii. Jest to pierwszy modułowy i wielonarzędziowy system chirurgiczny, wyposażony w układ ramion 2 + 1. Oznacza to, że ma dwa zewnętrzne ramiona pełniące funkcję narzędzi chirurgicznych, a także środkowe ramie, które jest wyposażone w platformę umożliwiającą jednoczesną pracę dwóch narzędzi roboczych typu RiH Uni System oraz toru wizyjnego.

Nowy model RiH mc<sup>2</sup> powstał w odpowiedzi na wnioski dotyczące funkcjonalności wcześniejszych modeli RiH 1, 2, 3 oraz Vision, które zostały zweryfikowane podczas eksperymen-

tów na zwierzętach. Problemy związane z kolizyjnością ramion robota, zwłaszcza w warunkach blisko siebie osadzonych narzędzi, takich jak podczas pobierania tętnicy piersiowej, zainspirowały do zmiany koncepcji przestrzennej, funkcjonalnej i konstrukcyjnej robota.

Tradycyjne telemanipulatory używane w chirurgii miały ramiona wyposażone jedynie w jedno narzędzie. Celem opracowania RiH  $mc^2$  było stworzenie rozwiązania eliminującego kolizyjność ramion telemanipulatora i umożliwiającego operowanie wieloma narzędziami jednocześnie. Przyrząd do wykonywania zabiegów medycznych zawiera trzy narzędzia (rys. 12, 13), z których dwa są wyposażone w chirurgiczne końcówki robocze, a trzecie, umieszczone między narzędziami, jest wyposażone w kamerę endoskopową. Narzędzia są osadzone na wspólnej konstrukcji wsporczej, poruszają się po indywidualnych prowadnicach z listwami zębatymi, a napęd realizowany jest za pomocą kół zębatych i silników bezszczotkowych firmy Maxon.

Platforma narzędziowa może być zamocowana na wózku jezdnym, który przemieszcza się po szynie zamocowanej na końcu ramienia telemanipulatora chirurgicznego (rys. 13) [10].

Należy podkreślić, że manipulatory równoległe pozwalają w sposób bezpośredni realizować funkcje kinematyczne bardzo trudne lub niemożliwe do uzyskania innymi metodami a bardzo korzystne w konstrukcji manipulatorów medycznych, w tym chirurgicznych. Na przykład możliwa jest realizacja czystego obrotu narzędzia chirurgicznego będącego przedmiotem manipulacji, względem nieistniejącej fizycznie osi. Mechanizmy równoległowodowe pozwalają przesunąć (offsetować) osie obrotu wybranych członów i ustalać je w przestrzeni względem innych wskazanych członów składowych, np. względem członu podstawy albo członu wyjściowego. Zasada ta jest podstawą dla projektowania mechanizmów manipulatorów tzw. stało-osioowych o osi obrotu ulokowanej na zewnątrz obszaru zajmowanego przez elementy mechanizmu. Konsolidacja takiego mechanizmu z szeregowo połączonym obrotem względem osi leżącej w płaszczyźnie jego ruchu pozwala na uzyskanie mechanizmu sferycznego, w którym punkty członu wyjściowego poruszają się po współśrodkowych powierzchniach sferycznych. Mówimy wtedy o mechanizmach stało-punktowych (sferycznych, kulistych). Ruch wypadkowy mechanizmu stało-osioowego jest efektem złożenia ruchów składowych połączonych ze sobą w odpowiedni sposób mechanizmów równoległowodowych. Mechanizm sprzężonego płaskiego równoległowodu podwójnego o czystym obrocie względnym członów skrajnych pokazano na rys. 14.

Ważnym zastosowaniem manipulatora równoległego typu Delta jest zrobotyzowany mikroskop operacyjny SurgiScope [24] (rys. 15). Jest on stosowany podczas operacji oczu.

W konstrukcji tego urządzenia medycznego jako układ nośny zastosowano manipulator robotyczny typu Delta, który jest równoległowodem przestrzennym o trzech stopniach swobody. Zadaniem układu jest jak najprostsza obsługa precyzyjnego mikroskopu wraz z układem optycznym końcówki lasera operacyjnego. Jest to możliwe, gdyż tak skonstruowany układ manipulacyjny został w pełni odciążony od sił grawitacji i dodatkowo zmechanizowany oraz zautomatyzowany (zrobotyzowany). Zaletą urządzenia jest łatwa i bardzo intuicyjna obsługa, co jest ważnym czynnikiem w rozwiązaniach sprzętu do zastosowań w chirurgii małoinwazyjnej.

## 5. Podsumowanie

Robotyzacja w medycynie postępuje niezwykle dynamicznie i roboty-telemanipulatory stają się normalnym wyposażeniem szpitali do codziennego użytku. Maszyny te pełnią coraz bardziej odpowiedzialne funkcje, znacznie ułatwiając lekarzom pracę. Dodatkowo wiele innowacyjnych pomysłów, takich jak operacje wykonywane zdalnie lub automatyczne narzędzia chirurgiczne, skutecznie przeszły ze sfery *science fiction* i stały się realną alternatywą dla tradycyjnych metod operacyjnych. Jest więc kwestią czasu, kiedy rozwiązania te staną się powszechne w zastosowaniach medycznych. Zanim jednak do tego dojdzie, potencjalni pacjenci muszą nabyć zaufania do takich rozwiązań w rękach lekarzy, co pozwoli zapewnić odpowiednie fundusze na dalszy rozwój oraz badania w tej dziedzinie. Mimo że urodziły się zbyt późno, aby być świadkami wynalezienia antybiotyków lub szczepionek, niewykluczone jest, że znaleźliśmy się na progu znacznie większej rewolucji medycznej – stopniowego zastępowania klasycznych metod chirurgii operacyjnej przez zrobotyzowane sale operacyjne obsługiwane przez lekarzy-operatorów pracujących pod nadzorem „wielkiego brata” – obserwacyjnych systemów nadzorczych z udziałem algorytmów sztucznej inteligencji.

### Nota od autorów

Artykuł jest wynikiem opracowania zbiorczego dotyczącego zastosowania robotów równoległych w medycynie w ramach przedmiotu „Manipulatory równoległe” prowadzonego na Wydziale Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej.



Rys. 14. Model techniczny manipulatora do chirurgii laparoskopowej z odsuniętą osią obrotu (rozwiązanie własne)

Fig. 14. Technical model of a manipulator for laparoscopic surgery with an offset axis of rotation (the own solution)



Rys. 15. Zrobotyzowany mikroskop operacyjny SurgiScope [24]

Fig. 15. SurgiScope robotic operating microscope

## Bibliografia

- Dupont P.E., Simaan N., Choset H., Rucker C., *Continuum Robots for Medical Interventions*, Proceedings of the IEEE, Vol. 110, No. 7, 2022, 847–870, DOI: 10.1109/JPROC.2022.3141338.
- Orekhov A.L., Aloï V.A., Rucker D.C., *Modeling parallel continuum robots with general intermediate constraints*, 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Singapore, 2017, 6142–6149, DOI: 10.1109/ICRA.2017.7989728.
- Fine H.F., Wei W., Goldman R.E., Simaan N., *Robot-assisted ophthalmic surgery*, “Canadian Journal of Ophthalmology”, Vol. 45, No. 6, 2010, 581–584, DOI: 10.3129/ij10-106.
- Wei W., Goldman R.E., Fine H.F., Chang S., Simaan N., *Performance Evaluation for Multi-arm Manipulation of Hollow Suspended Organs*, “IEEE Transactions on Robotics”, Vol. 25, No. 1, 2009, 147–157, DOI: 10.1109/TRO.2008.2006865.
- Yu H., Shen J.-H., Joos K.M., Simaan N., *Design, calibration and preliminary testing of a robotic telemanipulator for OCT guided retinal surgery*, 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Karlsruhe, Germany, 2013, 225–231, DOI: 10.1109/ICRA.2013.6630580.
- Myers K.J., *Arteriovenous Sheathotomy*, “Optometry – Journal of the American Optometric Association”, Vol. 75, No. 1, 2004, DOI: 10.1016/S1529-1839(04)70005-6.
- Laatikainen, L., Tarkkanen, A. & Koivuniemi, A. *Vitreotomy*, “International Ophthalmology”, Vol. 7, 1985, 215–222, DOI: 10.1007/BF00128368.
- Cepolina F., Diyon A., Jakubiak K., Matyja A., Matyja M., Ostrowski A., Razzoli R.P., Wilson T., *Chirurgia robotowa*, Raport 2023, Modern Healthcare Institute, ISBN: 978-83-968652-2-9.
- Saeidi H., Opferman J.D., Wei S., Leonard S., Hsieh M.H., Kang J.U., Krieger A., *Autonomous robotic laparoscopic surgery for intestinal anastomosis*, “Science Robotics”, Vol. 7, No. 62, 2022, DOI: 10.1126/scirobotics.abj2908.
- Nawrat Z., Mucha Ł., Lis K., Lechrich K., Rohr K., Kostka P., *Robot chirurgiczny Robin Heart Tele – następca Robin Heart mc<sup>2</sup>*, “Medical Robotics Reports”, Vol. 5, 2016, 27–33.
- Sangeeta S., *Ophthalmology in ancient time – the Sushruta Samhita*, “Journal of Clinical Ophthalmology and Research”, Vol. 6, No. 3, 2018, 117–120, DOI: 10.4103/jcor.jcor\_15\_17.
- Parasuraman R.R., Sheridan T.B., Wickens C.D., *A model for types and levels of human interaction with automation*, “IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part A: Systems and Humans”, Vol. 30, No. 3, 2000, 286–297, DOI: 10.1109/3468.844354.
- Mianowski K., *Manipulatory i roboty rehabilitacyjne oraz medyczne*, rozdział w „Biocybernetyka i Inżynieria Biomedyczna 2000”, t. 5 Biomechanika i Inżynieria Rehabilitacyjna pod red. M. Nałęcza, AOW EXIT, Warszawa 2004, 823–846.
- Nawrat Z., Podśędkowski L., Mianowski K., Kostka P., Wróblewski P., Pruski R., Małota Z., Religa Z., *RobIn Heart – polski robot kardiochirurgiczny – opis konstrukcji i sterowania*, „Pomiary Automatyka Robotyka”, Nr 3, 2004.
- Nawrat Z., Podśędkowski L., Mianowski K., Religa Z., *RobIn Heart 2003 – present state of the Polish telemanipulator project for cardiac surgery assistance*, “International Journal of Artificial Organs”, Vol. 26, No 7, 2003, 1115–1119, DOI: 10.1177/039139880302601209.
- Mianowski K., *On Some Aspects of Kinematic Properties of Parallel Manipulators Destined for Some New Applications*, Proceedings of the Third International Conference RoMoCo '02, 2002, 343–350, DOI: 10.1109/ROMOCO.2002.1177130.
- Nawrat Z., Podśędkowski L., Mianowski K., Wróblewski P., Kostka P., Baczyński M., Małota Z., Granosik G., Jezierski E., Wróblewska A., Religa Z., *RobIn Heart in 2002 – Actual State of Polish Cardio-Robot*, Proceedings of the Third International Conference RoMoCo '02, 2002, 33–38, DOI: 10.1109/ROMOCO.2002.1177080.
- Mianowski K., Nawrat Z., *Perspectives of medical robotics evolution in Poland in the beginning of twenty first century*, Proceedings of International Conference MMAR '02, Szczecin 2002, 933–940.
- Podśędkowski L., Mianowski K., Wróblewski P., Nawrat Z., *Kinematic aspects of selected manipulators for cardiac surgery*, Proceedings of International Conference MMAR '02, Szczecin 2002, 923–928.
- Witkowski M., Mianowski K., *Mechanical design of a new type of surgical manipulator*, Proceedings of 5<sup>th</sup> International PhD Conference on Mechanical Engineering, 2007.
- Barczak T., Mianowski K., *Projekt zadajnika i manipulatora sferycznego przeznaczonego do chirurgii laparoskopowej*, „Problemy Robotyki”, red. K. Tchoń i C. Zieliński, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2012, t. 1, 25–34.
- Mianowski K., *Nowe rozwiązanie manipulatora równoległego typu POLMAN do wspomagania operacji chirurgicznych metodą laparoskopową*, „Nowoczesne Narzędzia Informatyczne w Praktyce Chirurgicznej”, Wydawnictwo CEMED, Warszawa 2007, 97–104.
- Witkowski M., Mianowski K., *Projekt manipulatora nowego typu o wysokich właściwościach funkcjonalnych*, Materiały Konferencji Doktorantów Politechniki Warszawskiej młodzi naukowcy wobec wyzwań współczesnej techniki, Warszawa 2007.
- Bonev I., *Delta Parallel Robot – the Story of Success*, [www.parallemic.org/Reviews/Review002.html].

## Inne źródła

- Synektik, *Chirurgia robotyczna da Vinci*, [https://synektik.com.pl/produkty/chirurgia-robotyczna-da-vinci].
- WP Tech, *Operacje na odległość to dopiero początek. 5G zmieni ochronę zdrowia*, [https://tech.wp.pl/operacje-na-odleglosc-to-dopiero-poczatek-5g-zmieni-ochrone-zdrowia,6453058679244929a].
- IRCAD, *Obraz przedstawiający zabieg chirurgiczny na odległość*, [www.ircad.fr/le-geste-chirurgical-a-traverse-latlantique].
- Olszewski M., *Robotyka studia inżynierskie V – PW Mechatronika, Robotyka\_03\_inz\_2022*.
- Wikipedia contributors. *Stewart platform*, [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Stewart\_platform&oldid=1230138190].
- https://www.webofscience.com/wos/woscc/analyze-results/30664974-8319-48b6-b33a-cc8fd6e01b07-b9d20b93) (dostęp na dzień 02.12.2023).

# Parallel Robots for Precise Manipulation in Surgical Operations

**Abstract:** The article presents the state of the art solutions, regarding parallel robots used for precise manipulation in surgical procedures. The status of new, modern surgical techniques currently being developed, requiring high accuracy and efficiency of procedures ensuring very low invasiveness of the surgery, was briefly reported. Based on the available literature and Internet materials, a number of new, innovative solutions for the design of parallel manipulators that meet the criteria for conducting surgical operations were presented. Particular attention was paid to the interdisciplinarity of this field of research.

**Keywords:** parallel robot, surgical operating robot, precise remote manipulation

## inż. Jakub Grzonkowski

jakub.grzonkowski.stud@pw.edu.pl  
ORCID: 0009-0007-8978-3847

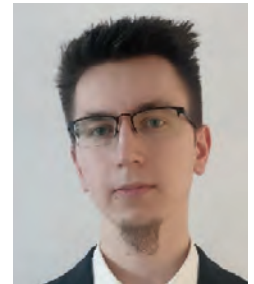
Student Wydziału Mechanicznego Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej. Absolwent Wydziału Mechatroniki na specjalności „Inżynieria Fotoniczna” oraz Technikum Mechatronicznego nr 1 przy ul. Wiśniowej. Zainteresowany robotyką, szeroko pojętą automatyką oraz budową maszyn.



## inż. Filip Gruca

filip.gruca.stud@pw.edu.pl  
ORCID: 0009-0006-0409-6064

Student Wydziału Mechanicznego Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej. Absolwent Wydziału Samochodów i Maszyn Roboczych. Zainteresowany elektroniką, programowaniem systemów wbudowanych, robotyką medyczną i systemami wizji maszynowej.



## inż. Jan Makulec

jan.makulec.stud@pw.edu.pl  
ORCID: 0009-0000-7278-9088

Student Wydziału Mechanicznego Energetyki i Lotnictwa. Absolwent Wydziału Inżynierii Produkcji (nowa nazwa Mechaniczny Technologiczny) na kierunku Automatyka i Robotyzacja Procesów Produkcyjnych. Zainteresowany automatyką, konstruowaniem i tworzeniem animacji.



## dr inż. Krzysztof Mianowski

krzysztof.mianowski@pw.edu.pl  
ORCID: 0000-0002-0721-1172

Adiunkt w Zakładzie Teorii Maszyn i Robotów w Instytucie Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej na Wydziale Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa w Politechnice Warszawskiej, którego jest absolwentem. Jego zainteresowania naukowe skupione są wokół tematyki konstrukcji mechanicznych robotów, w szczególności robotów medycznych i manipulatorów równoległych, jest także współtwórcą koncepcji robota chirurgicznego RobIn Heart opracowanego w latach 2001–2004 w Fundacji Rozwoju Kardiologii w Zabrze oraz głównym konstruktorem manipulatora robota chirurgicznego RobIn Heart v. 2.0.

