



Roboty medyczne

Roboty nie tylko wspomagają wykonywanie zabiegów chirurgicznych, ale także ułatwiają rehabilitację osób po udarach mózgu lub zabiegach ortopedycznych, umożliwiają podnoszenie unieruchomionych pacjentów, przygotowują indywidualne dawki leków czy – w postaci nanorobotów – wnikają w ciało pacjenta w celach diagnostycznych lub interwencyjnych.

WITOLD PONIKŁO

Pojęcie „roboty medyczne” pojawia się coraz częściej w naszym słownictwie. I nie ma wątpliwości, że ten trend będzie się nasilał wobec poszerzających się możliwości i częstości stosowania tak nazwanych urządzeń. Roboty medyczne pozornie pozostają w tyle za robotami przemysłowymi, które zdominowały takie czynności, jak na przykład montaż samochodów czy produkcja elektroniki. Później, gdyż roboty przemysłowe wykonują (zwykle) powtarzające się czynności, przy praktycznej eliminacji bieżącej ingerencji człowieka. Roboty medyczne nie są przygotowane do wykonywania pracy bez bieżącego nadzoru człowieka, co wynika z niepowtarzalności (w szczegółach) realizowanych zadań i środowiska ich wykonywania. Mimo to, roboty medyczne to wysoko zaawansowane technicznie wyroby medyczne, z bardzo obiecującymi perspektywami rozwoju.

Roboty medyczne zwykle kojarzą się z „narzędziem”, którym posługuje się chirurg. Ale rzeczywistość jest znacznie bogatsza. Roboty nie tylko wspomagają wykonywanie zabiegów chirurgicznych, ale także

ułatwiają rehabilitację osób¹ po udarach mózgu lub zabiegach ortopedycznych, umożliwiają podnoszenie unieruchomionych pacjentów, przygotowują indywidualne dawki leków czy – w postaci nanorobotów – wnikają w ciało pacjenta w celach diagnostycznych lub interwencyjnych. Dodatkowo, roboty medyczne, wykorzystując sztuczną inteligencję, mogą nadzorować stan zdrowia pacjentów czy odpowiadać werbalnie na pytania dotyczące zdrowia. Skoncentrujmy się jednak na dwóch, najbardziej spektakularnych rodzajach robotów medycznych: robotach chirurgicznych i nanorobotach.

Roboty chirurgiczne

Roboty chirurgiczne, spośród których najbardziej rozpoznawalny jest da Vinci Surgical System, wprowadzony na rynek medyczny 20 lat temu, są – w przeciwieństwie do robotów przemysłowych – pomyślane jako „narzędzia medyczne”, czyli wyroby znajdujące się pod całkowitą kontrolą chirurga. Zadaniem robota jest „przetworzenie” poleceń operatora, przekazywanych

urządzeniu – zwykle przy pomocy przestrzennego joysticka – na konkretne ruchy i czynności elementów (narzędzi) wykonawczych umieszczonych na końcach ramion robota. Każdy operator robota musi – poprzez długi trening – uzyskać pełną kontrolę nad urządzeniem. Jest to czasochłonny i kosztowny proces, podobnie jak i sam zakup robota. Zatem jakie są zalety, które kompensują owe koszty wraz z kosztami eksploatacyjnymi (jednorazowe², kosztowne narzędzia montowane do ramion robota)?

Najszybszą odpowiedzią na powyższe pytanie jest odwołanie się do pojęcia chirurgii minimalnie inwazyjnej. Zamiast otwartego pola operacyjnego umożliwiającego pracę dłoni chirurga, cel operacji jest osiąganym poprzez niewielkie nacięcia, którymi wprowadzane są do wnętrza ciała narzędzia przedłużające ramiona robota. W efekcie takiej operacji pacjent traci mniej krwi (w porównaniu do operacji standardowej), ryzyko powikłań pooperacyjnych jest mniejsze, a minimalizacja cięcia tkanek w istotnym stopniu zmniejsza ból pooperacyjny, co umożliwia szybszy powrót pacjenta do codziennych aktywności. Sama operacja wykonywana przez robota jest bezpieczniejsza dla pacjenta wobec eliminacji nieuniknionych błędów (drżenia rąk) chirurga. Na przykład, da Vinci posługuje się czterema ramionami, z których każde może wykonywać płynne ruchy, anatomicznie niedostępne dla dłoni człowieka (np. obrót narzędzia o 360°), a wyposażenie ramion w kamery endoskopowe pozwala obserwować przedmiot interwencji chirurgicznej z bezpośredniej odległości na ekranie monitora (obraz 3D, HD). I co szczególnie istotne, robot jest gotowy do pracy 24 godziny na dobę. To chirurg potrzebuje odpoczynku, a robot, po zakończeniu jednej operacji, może (po wymianie narzędzi) bezzwłocznie rozpocząć drugi zabieg, tym razem sterowany przez innego, wypoczętego chirurga.

Można wyróżnić dwa rodzaje pracy operatora robota medycznego: z bezpośredniego sąsiedztwa pacjenta i operacji zdalnej. W przypadku klasycznej pracy manualnej, kontrola ruchów (ręki chirurga) za pomocą wzroku odbywa się bez dostrzegalnego dla człowieka opóźnienia. Robot wykonujący operację praktycznie nie zwiększa tego opóźnienia, jednak pod warunkiem, że operator kontroluje go bezpośrednio. Znacznie gorzej jest w przypadku, gdy obraz z monitora robota przekazywany jest operatorowi na odległość (dotyczy to zarówno pomieszczenia sąsiedniego do sali operacyjnej, w której pracuje robot, jak i transmisji danych na inny kontynent). Opóźnienie wynikające z czasu transmisji obrazu tam i z powrotem oraz czasu reakcji operatora stanowi pewien problem – szczególnie w przypadku operacji na bijącym sercu – i w przeciwieństwie do telekonsultacji, nie jest dziś szeroko stosowane.

Roboty medyczne zamieniają się rolami – w określonych zastosowaniach – z człowiekiem. O ile robot da Vinci wykonuje to, co poleca mu chirurg/operator, o tyle w projekcie MURAB³ robot pomaga lekarzowi wykonać z maksymalną precyzją biopsję⁴. Oczywiście MURAB nie wydaje poleceń lekarzowi, ale wykorzystu-

jąc dane z obrazu uzyskanego z badania MRI i dane z obrazowania ultrasonograficznego, „podpowiada” diagnoście optymalne miejsce pobrania próbki tkanki i ustawia igłę biopsyjną we właściwym położeniu. Dodatkowo, rozszerzenie projektu zakłada ustalenie podczas biopsji optymalnej objętości pobieranej tkanki.

Neuronawigacja

Niezwykle interesującym zastosowaniem robotów medycznych jest neuronawigacja⁵ – technologia coraz powszechniej stosowana podczas operacji mózgu. O ile obrazowanie mózgu staje się coraz dokładniejsze i bardziej komfortowe dla pacjenta⁶, o tyle precyzja neurochirurga decyduje nie tylko o sukcesie operacji polegającym na precyzyjnym usunięciu zwyrodniałej tkanki, ale także o skutkach, jakie wywoła dotarcie do niej. Czy wycięcie nowotworu z mózgu można uznać za sukces, jeżeli w trakcie operacji uszkodzone zostaną obszary mózgu odpowiedzialne za pamięć, widzenie czy uczucia? Neuronawigacja ma za zadanie ułatwić pracę neurochirurgowi i zapewnić możliwie najwyższe bezpieczeństwo pacjenta poprzez minimalizację lub wręcz eliminację skutków ubocznych operacji. Podstawą tej technologii jest dokładna wizualizacja tkanki będącej przedmiotem zabiegu, a następnie jej lokalizacja poprzez odniesienie do punktów stałych – zwykle wybranych kości czaszki pacjenta⁷. Wizualizację wykonuje się, używając fuzji różnych technik obrazowania – CT, MRI, fMRI, PET – dodatkowo z użyciem znaczników odpowiadających położeniu wspomnianych powyżej punktów stałych czaszki. Tak przygotowane obrazy wprowadzane są do pamięci urządzenia. W fazie przygotowania do operacji głowa pacjenta jest unieruchamiana w pozycji pozostającej w relacji z obrazami diagnostycznymi i jednocześnie identyfikującymi samego pacjenta oraz tkankę stanowiącą cel operacji. Technologia neuronawigacji sprowadza się do informowania neurochirurga – na obrazie uzyskanym przed operacją, gdzie (w jakich ośrodkach mózgu) znajduje się używane przez niego narzędzie chirurgiczne. Jest to nieporównywalnie dokładniejsza technika niż posługiwanie się przez operatora wyłącznie wzrokiem. Aby owa informacja była dostępna, narzędzie (a dokładniej jego część robocza, zwykle ostrze) musi się komunikować z komputerem systemu neuronawigacji, który zaznacza na obrazie diagnostycznym prezentowanym operatorowi na monitorze położenie narzędzia. Początkowo do lokalizacji narzędzia używano mikrofonów i elektrod generujących ultradźwięki. Obecnie nośnikiem informacji jest światło emitowane z LED umieszczonych na narzędziu i odbierane przez soczewki zlokalizowane na różnych płaszczyznach powiązanych ze wskazanymi wyżej punktami odniesienia. Ta technika pozwala na uzyskanie lokalizacji narzędzia z dokładnością 0,4 mm.

Kapsułka endoskopowa

Roboty służą także do prowadzenia diagnostyki, w zakresie niemożliwym do uzyskania bez ich pomocy. ►

► Dobrym przykładem jest tu stosowana od kilku lat w badaniach przewodu pokarmowego „pastylka” endoskopowa. Miniaturowy robot jednorazowego użytku, w kształcie kapsułki (typowe wymiary to średnica około 11 mm i długość: 25 mm) zawiera źródło energii, źródło światła, kamerę i nadajnik radiowy, transmitujący obraz do zewnętrznego rejestratora. Kapsułka, wykorzystując naturalne ruchy przewodu pokarmowego, przemieszcza się przez całą jego długość, rejestrując obrazy niedostępne dla endoskopu czy kolonoskopu. Choć powyższy opis brzmi dość prosto w dobie miniaturyzacji elektroniki i łatwości transmisji radiowej, to poziom komplikacji tego robota należy oceniać także z uwzględnieniem takiego problemu, jak na przykład zapewnienie czystego pola widzenia dla kamery w dowolnym odcinku układu pokarmowego.

Doświadczenia uzyskane z użytkowania pastylki endoskopowej stały się zapewne inspiracją do zaprojektowania i produkcji miniaturowego robota wykonującego pracę na powierzchni bijącego serca. Robot jest wprowadzany do ciała pacjenta poprzez niewielkie nacięcie przy mostku i wykorzystując podciśnienie wytwarzane w zewnętrznej pompie „przykleja” się do powierzchni serca. Operator, sterując podciśnieniem, może przemieszczać robota aż do uzyskania pożądanej lokalizacji, gdzie przeprowadzany jest zabieg – np. elektrostymulacja nasierdżiowa. Ruch robota wyposażonego w magnes jest monitorowany przez umieszczony na klatce piersiowej pacjenta czujnik i obserwowany przez operatora na monitorze.

Nanoroboty medyczne

Specjalną kategorią robotów – ciągle jeszcze w stadium eksperymentu – są nanoroboty medyczne. Urządzenia są definiowane poprzez ich rozmiar – co najmniej jeden z ich wymiarów nie może przekraczać 100 nanometrów⁸. Najbardziej zaawansowanym pomysłem na zastosowanie nanorobotów jest wykorzystywanie ich w roli dostarczyciela leków do wybranych organów pacjenta. Bardzo obiecująco prezentują się tu eksperymenty z leczeniem wątroby – aplikowany bezpośrednio lek nie ulega rozkładowi metabolicznemu podczas „transportu” do tego organu, zatem moż-

na stosować jego mniejsze dawki, osiągając wyższą skuteczność i eliminując efekty uboczne. Równie obiecujące są eksperymenty bezpośredniego dostarczenia leków do mięśnia sercowego. Nanoroboty mogą również znaleźć zastosowanie w onkologii. Szczególnie interesująco wyglądają dwa kierunki prowadzonych testów. W jednym z projektów nanoroboty blokują naczynia krwionośne odpowiadające za ukrwienie komórek nowotworowych, co skutkuje ich obumarciem. Inne prace koncentrują się na powierzeniu robotom roli nanochirurga, pobierającego wycinki tkanki nowotworowej, z perspektywą całkowitego wycinania zrakowaciałych komórek. Owe procesy mogą odbywać się na dwa sposoby – nanorobot jest monitorowany i sterowany przez chirurga z wykorzystaniem pola magnetycznego i elektromagnetycznego lub wręcz, wykorzystując sztuczną inteligencję, wykonuje zaprojektowane działania samodzielnie.

Szczególnie futurystycznie brzmią projekty nanorobotów – inspirowane zapewne grafikami gier komputerowych – które poruszają się wraz z przepływającą w naczyniach krwionośnych krwią i niszczą napotkane bakterie. Projekt jest awangardowy, tak że względu nanorozmiary robota, jak i z uwagi na współpracę z systemem immunologicznym pacjenta. Wykonany ze złotych nanodrutów robot jest pokryty trombocytami oraz erytrocytami i mechanicznie wychwytuje ze strumienia krwi pobliskie bakterie. Nanorobot może być także nasycony antybiotykiem i kierowany – z użyciem ultradźwięków – w rejony ciała dotknięte infekcją.

Podsumowanie

Powyżej powołano się na istniejące już i znajdujące się w fazie eksperymentów roboty medyczne. Bazując na tempie rozwoju współczesnych technologii: elektroniki, inżynierii materiałowej czy informatyki – z uwzględnieniem coraz szerszego zastosowania sztucznej inteligencji – można przypuszczać, że w ciągu następnych kilku lat ten tekst będzie miał co najwyżej znaczenie historyczne, wobec realiów technologii medycznych. A że będzie to z korzyścią dla pacjenta, owej dezaktualizacji należy sobie życzyć jak najprędzej. □

Przypisy

- ¹ System wspomagający szkielet/mięśnie żołnierzy dzwigających ciężkie wyposażenie bojowe (exoskeleton) doskonale sprawdza się przy rehabilitacji osób sparaliżowanych.
- ² Konstrukcja narzędzi jest ukierunkowana na ich funkcjonalność, co przy stopniu komplikacji ich konstrukcji uniemożliwia usunięcie z ich „zakamarków” resztek biologicznych, a tym samym skuteczną sterylizację.
- ³ *MRI and Ultrasound Robotic Assisted Biopsy.*
- ⁴ Obecnie projekt MURAB ukierunkowany jest na biopsję piersi i mięśni.
- ⁵ Operacje z użyciem neuronawigacji po raz pierwszy wykonano w Rumunii, na początku pierwszej dekady XXI w.

- ⁶ W roku 1918 Dandy opisał technikę obrazowania mózgu polegającą na wprowadzeniu do czaski najpierw powietrza potem kontrastu. Następną technologią była angiografia mózgu, która umożliwiała pośrednią lokalizację nowotworu poprzez analizę odkształcenia naczyń krwionośnych mózgu w odniesieniu do prawidłowej anatomii.
- ⁷ Inne opcje to specjalny „hełm” (podobny do stosowanego podczas radioterapii) lub technika opisywania zarysu twarzy poprzez znaczną liczbę punktów.
- ⁸ 1 nanometr to jedna miliardowa metra, czyli jedna milionowa milimetra. Dla porównania, włos ludzki ma średnicę około 0,1 milimetra.