

Sterowanie robotem chirurgicznym z siłowym sprzężeniem zwrotnym – wstępne testy funkcjonalne robota Robin Heart

The surgical robot control with force feedback – preliminary functional tests of Robin Heart robot

Artykuł recenzowany

Streszczenie

Testy robota chirurgicznego typu Robin Heart obejmują badania układów mechatronicznych, układów sterowania, badania symulacyjne i laboratoryjne wykonywania zadań chirurgicznych oraz badania na zwierzętach i planowane badania kliniczne.

Cechy funkcjonalne robota, które pozwalają na osiągnięcie wysokiej precyzji zdalnego sterowania wymagają testów z udziałem człowieka. Celem publikacji jest przedstawienie wstępnych badań sprzężenia siłowego. Opisano system badawczy i metodologię badań na przykładzie pomiaru subiektywnej oceny sztywności materiałów.

Abstract

Robin Heart surgical tests include mechatronic systems, control systems, simulation and laboratory tests for performing surgical tasks, as well as animal studies and planned clinical trials.

The functional features of the robot, which allow for high precision of remote control, require tests involving humans. The aim of the publication is to present preliminary force feedback tests. The research system and research methodology are described on the example of measuring the subjective stiffness assessment of materials.

**DARIUSZ KRAWCZYK¹,
ŁUKASZ MUCHA¹,
KRZYSZTOF LIS²,
ZBIGNIEW NAWRAT^{1,3}**

¹Pracownia Biocybernetyki,
Fundacja Rozwoju Kardiochirurgii
im. prof. Zbigniewa Religi w Zabrze,
²Katedra Budowy Maszyn,
Politechnika Śląska w Gliwicach,
³Katedra i Zakład Biofizyki,
Śląski Uniwersytet Medyczny
w Katowicach

Słowa kluczowe:
*robot, robot chirurgiczny,
sprzężenie siłowe,
układy haptyczne*

Keywords:
*robot, surgical robot,
force-feedback,
haptic systems*

■ WSTĘP

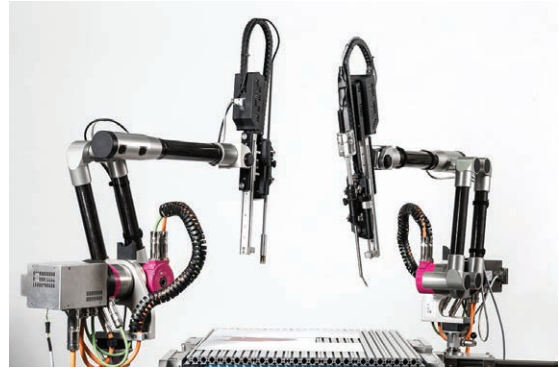
Medyczne specjalności zabiegowe wymagają innowacyjnych narzędzi dla zmniejszenia inwazyjności prowadzonych operacji oraz standaryzacji, czyli podniesienia i kontrolowania jakości procedur chirurgicznych. Jedynym z rozwiązań pozwalającym na osiągnięcie tych celów jest zastosowanie robotowych narzędzi chirurgicznych. Dzięki oddaleniu chirurga od miejsca ingerencji w ciele pacjenta i wprowadzeniu systemu mechatronicznego nadzorowanego komputerowo, możemy zastosować nowoczesne procesy planowania i działania „opartego na faktach”. Analiza danych typu Big Data zawierających informacje z wcześniejszych operacji oraz obrazy diagnostyczne (pozyskiwane również na żywo, w trakcie operacji), wsparta metodami sztucznej inteligencji, może wspomóc efektywność prowadzenia zabiegów. Jednak z powodu braku pełnej sensoryczności robotów do tej pory są to jedynie telemanipulatory. Zdalne sterowanie, by było skuteczne, bezpieczne, precyzyjne – wymaga udoskonalania przekazu informacyjnego zwrotnej (głównie obrazu), ale również wprowadzenia efektywnego sprzężenia siłowego.

W naturalnych warunkach odczucie reakcji siłowych chirurga często decyduje o jakości wyników operacji. Dlatego warto taką funkcjonalność wprowadzić do robotów chirurgicznych.

W chirurgii stosowane są [1]: a) roboty toru wizyjnego zastępujące asystenta w czasie operacji – chirurg może samodzielnie sterować położeniem kamery endoskopowej; b) telemanipulatory chirurgiczne, które umożliwiają wykonywanie operacji na odległość (zdalnie sterowane roboty) np. robot Zeus (Computer Motion, USA), da Vinci (Intuitive Surgical, USA) czy polski Robin Heart; c) roboty nawigacyjne (bierne) – służą do dokładnego pozycjonowania i realizacji prawidłowego toru ruchu narzędzia; d) roboty nawigacyjne (czynne) – roboty pracujące jako narzędzia wykonawcze w systemie odwzorowania trajektorii określonej podczas planowania przedoperacyjnego (nawigacyjne czynne) oraz e) roboty biochirurgiczne (do manipulacji komórkowej).

Dominującą rolę na rynku robotów chirurgicznych na świecie (około miliona operacji rocznie) odgrywa amerykański da Vinci (Intuitive Surgical, CA). W Polsce obecnie roboty da Vinci znajdują się: 1) we Wrocławiu (2010 – zespół prof. W. Witkiewicza, Wojewódzki Szpital Specjalistyczny); 2) w Toruniu (2017 r. Specjalistyczny Szpital Miejski); 3) dwa roboty w Warszawie (2018 r. w Szpitalu Mazovia oraz szpitalu Medicover); 4) w Poznaniu (2018, Wielkopolskie Centrum Onkologii); 5) w Krakowie (2019 Szpital na Klinach).

W Fundacji Rozwoju Kardiologii im. Prof. Zbigniewa Religi FRK w Zabrzcu powstała rodzina manipulatorów Robin Heart [2]. System sterowania robo-



Rysunek 1. Stanowisko Robot Robin Heart DUO

tem Robin Heart składa się z konsoli wyposażonej w monitory i specjalizowane zadajniki ruchu wraz z systemem wieloprocesorowym z zaimplementowanym oprogramowaniem realizującym wiele funkcji, do których należą między innymi: komunikacja, nadzorowanie, sterowanie napędami, obliczanie pozycji, realizacja siłowego sprzężenia i wiele innych. Zadajnik ruchu jako element interfejsu człowiek – maszyna (HMI – ang. *Human Machine Interface*) to system, który jest optymalizowany do określonych zadań [3]. Narzędzia chirurgiczne wykonujące różne zadania wymagają siły od 0,3 N do 4 N [4] aż do 50 N [5]. Na podstawie badań własnych i przeglądu doniesień literaturowych określono, dla typowych procedur chirurgicznych na tkankach miękkich, zakres sił w granicach 0-15 N [6]. Wykazano w wielu pracach, że brak sprzężenia siłowego wpływa na precyzję i bezpieczeństwo operacji [7]. Lekarze oczekują szybkich postępów w zakresie wdrażania narzędzi o korzystnych cechach nie tylko manipulacyjnych, ale również sensorycznych. Oczekuje się czułych zadajników ruchu, które można by stosować we wszystkich medycznych telemanipulatorach, także stosowanych w rehabilitacji i robotach telediagnostycznych.

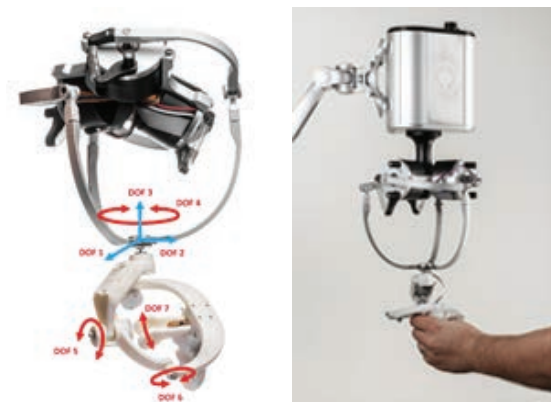
Obecnie w FRK prowadzone są badania rozwojowe dotyczące systemu haptycznego sterowania robotem na specjalnym stanowisku Robin Heart Duo.

■ ROBOT ROBIN HEART DUO

Robot Robin Heart DUO (Rys. 1) składa się z dwóch zmodyfikowanych ramion robotycznych Robin Heart PorVisionAble (RH PVA). Kamery endoskopową zastąpiono narzędziem mechatronicznym wyposażonym w czujniki siły. Zmodyfikowano również system sterowania robotem tak aby dysponował dostępnymi dla zastosowanych układów napędowych parametrami. Stosowane standardowo parametry ruchu oraz siły są mocno ograniczone ze względu na specyficzne wymagania aplikacyjne RH PVA. Operator może sterować ruchem każdego z ramion wyposażonych w narzędzia lub układy pomiarowe przy



Rysunek 2. Konsola sterowania Robin Stiff Flop DUO



Rysunek 3. Zadajnik ruchu Robin Hand

pomocy haptycznych interfejsów konsoli Robin Stiff Flop DUO. Z mechanicznego punktu widzenia ramiona poruszają się w kinematyce sferycznej, w 4 stopniach swobody i w zakresie przemieszczeń: $\alpha = \pm 60^\circ$, $\beta = \pm 80^\circ$, obrót narzędzia $\pm 130^\circ$ i $Z = 0 \div 150 \text{ mm}$. Rozdzielczość pozycjonowania końcówki ramienia wynosi nie mniej niż 0,5mm.

KONSOLA STEROWANIA ROBIN STIFF FLOP DUO

Konsola sterowania robotem Robin Stiff Flop DUO (Rys. 2) została opracowana w ramach projektu europejskiego Stiff-Flop. Na potrzeby prac badawczych zostało zmodyfikowane oprogramowanie i magistrala wymiany danych dostosowana do standardu komunikacji zgodnego ze sterowaniem robotami Robin Heart DUO.

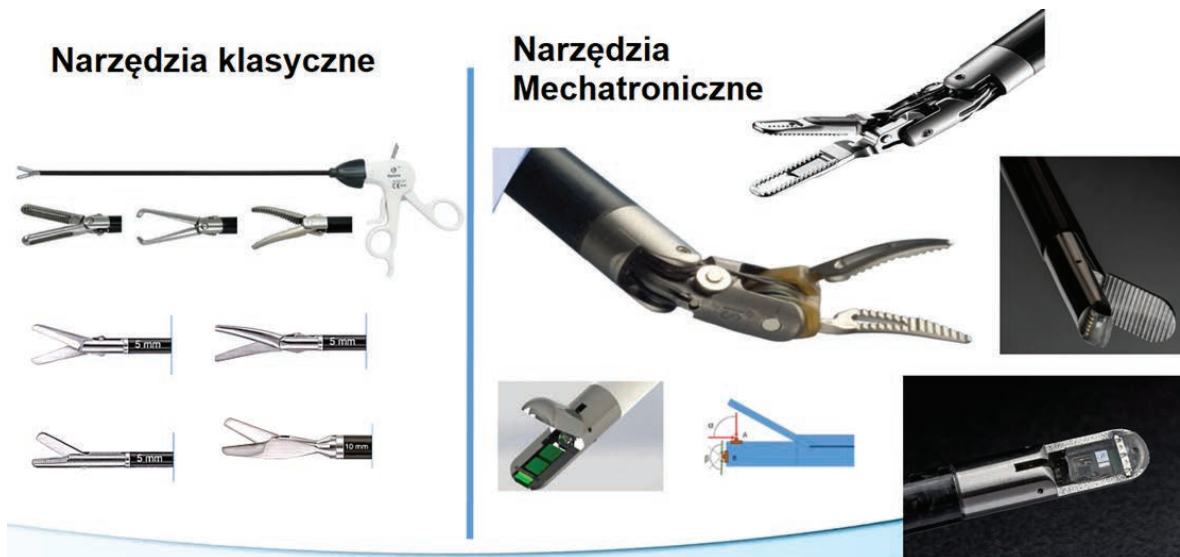
Konsola posiada dwa dotykowe monitory, dwa zadajniki ruchu oraz przycisk nożny. Jeden z monitorów przedstawia na żywo obraz z kamery umieszczonej na ramieniu robota, natomiast drugi umożliwia podgląd danych diagnostycznych pacjenta oraz wyświetla aplikację sterującą całym systemem.

Sygnalem wyjściowym z konsoli jest informacja o pozycji i orientacji obydwu dłoni operatora robota. Dane te są transmitowane za pomocą dwóch równoległych sieci CAN do mikrokontrolera sterującego napędami robota, gdzie po uwzględnieniu równań kinematyki robot wykonuje ruch nadążny do zadanej pozycji. Sygnalem wejściowym konsoli sterowania jest informacja pochodząca z sensorów robota, która jest transmitowana za pomocą kolejnej magistrali CAN do zadajników ruchu. Na podstawie danych wejściowych generowane jest sprzężenie siłowe. Dodatkowym sygnałem wejściowym jest obraz z kamery endoskopowej oraz informacja, czy przyciśnięty jest przycisk nożny odpowiadający za odblokowanie zadajników ruchu. Dla celów badawczych, do detekcji subiektywnego odczucia określonych cech, wprowadzono dodatkowy przycisk ręczny.

ZADAJNIK RUCHU ROBIN HAND

Zadajnik Robin Hand (Rys. 3) – jest haptycznym manipulatorem, którym chirurg steruje podczas operacji. Służy do określenia położenia i orientacji dłoni chirurga oraz generowania siły (sprężenia zwrotnego) na dłoń operatora.

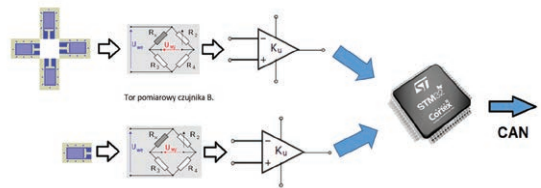
Zadajnik ruchu Robin Hand przedstawiony na rysunku 3 posiada siedem stopni swobody. Całość konstrukcji można podzielić na dwie części: część główną odpowiedzialną za stopnie swobody DOF1, DOF2, DOF3 (*ang. Degrees Of Freedom*), co odpowiada współrzędnym X, Y, Z w układzie kartezjańskim oraz część chwytową odpowiedzialną za pozostałe stopnie swobody (DOF4, DOF5, DOF6, DOF7). Ramiona zadajnika ruchu dla stopni swobody 1, 2, 3 zostały osadzone na silnikach BLDC wyposażonych w precyzyjne układy pomiarowe (przetworniki obrotowo impulsowe o rozdzielczości 8192 impulsów/obrot) dzięki czemu możliwy jest jednoczesny odczyt pozycji oraz generowanie siły jako sprzężenia siłowego na dłoń chirurga.



Rysunek 4. Porównanie narzędzi klasycznych z narzędziami mechatronicznymi



Rysunek 5. Narzędzie mechatroniczne z czujnikiem siły znajdującym się na końcu narzędzia



Rysunek 6. Budowa narzędzia mechatronicznego

■ NARZĘDZIE MECHATRONICZNE

W projekcie polskiego robota wprowadzono chirurgiczne narzędzia mechatroniczne typu Robin Heart Uni System, które można stosować jak końcówkę roboczą robota lub jako narzędzie uchwycone w dłoni. Przewaga narzędzia mechatronicznego nad narzędziem klasycznym polega na uzyskaniu dodatkowych możliwości ruchowych (Rys. 4) i funkcyjnych uruchamianych za pomocą elektronicznych przycisków i mikrozdwojstników.

Robot Robot Robin Heart DUO wyposażono w specjalną wersję narzędzi pomiarowych:

1. narzędzie z czujnikiem siły znajdującym się na jego końcu

2. narzędzie z czujnikiem siły znajdującym się w połowie części walcowej łączącej część roboczą oraz chwytową narzędzia.

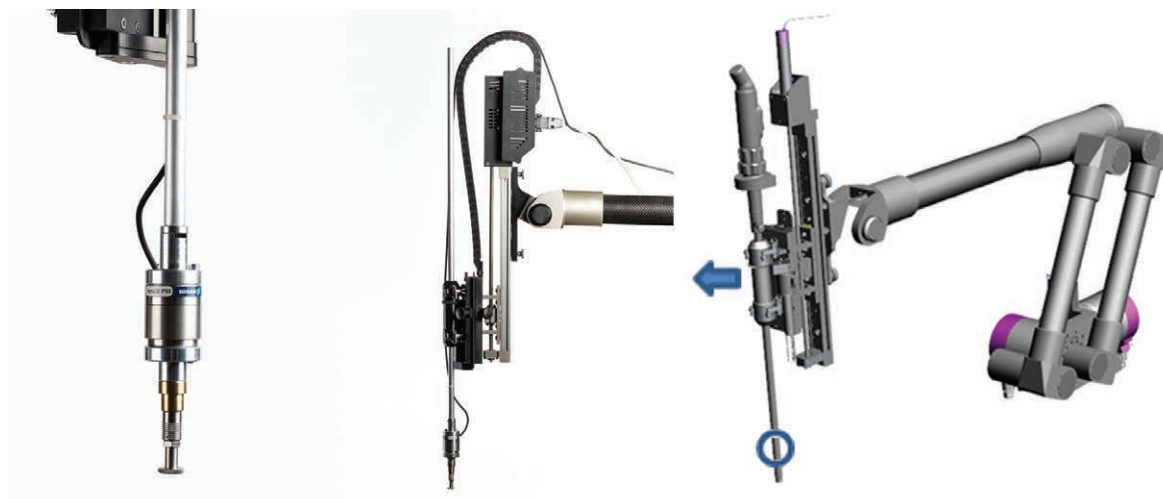
Ad 1. Narzędzie mechatroniczne z czujnikiem siły znajdującym się na końcu narzędzia (Rys. 5) wyposażone jest w mechatroniczną część chwytową (*ang. Griper*) oraz dwa sensory siły. Narzędzie mechatroniczne posiada również serwomechanizm służący do sterowania częścią chwytową. Czujnik A z rys. 5 służy do mierzenia siły wywieranej przez narzędzie na ciało pacjenta w trzech osiach X, Y, Z. Czujnik dodatkowy B

z Rys. 5 służy do pomiaru siły wywieranej na tkanę podczas uchwytu.

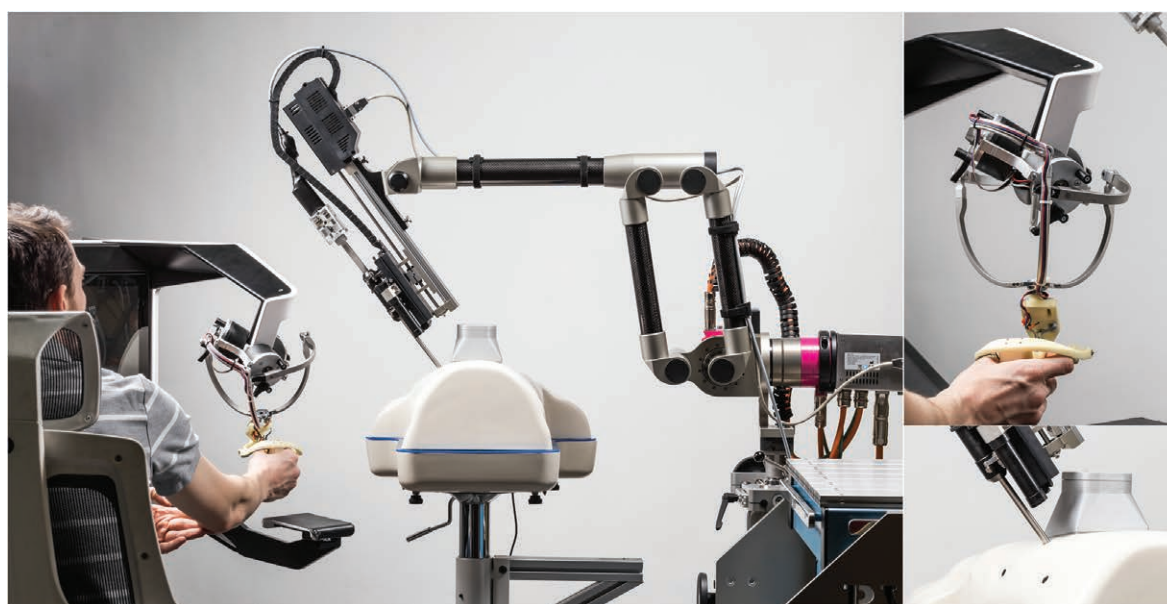
Czujnik czołowy B składa się z czterech tensometrycznych czujników siły pozwalających na pomiar trzech składowych. Czujnik A realizuje pomiar jednej składowej i również bazuje na sensorach tensometrycznych (Rys. 6). Analogowy sygnał z czujników po odpowiednim wzmacnieniu przy użyciu wzmacniaczy operacyjnych o programowalnym wzmacnieniu trafia do przetwornika analogowo-cyfrowego a następnie do mikrokontrolera. Tam sygnał zostaje przeliczony na konkretne wartości siły. Tak przygotowany sygnał trafia za pomocą magistrali CAN do konsoli sterowania.

Ad 2. Kolejne badawcze narzędzie mechatroniczne posiada czujnik siły umieszczony w połowie części walcowej narzędzia (Rys. 7). Zaletą takiego rozwiązania jest brak podzespołów elektronicznych zasilanych napięciem elektrycznym wewnątrz ciała pacjenta. W miejsce sensorów usuniętych z części końcowej narzędzia można zastosować dodatkowe ruchome stopnie swobody, zwiększając możliwości manipulacji wewnątrz ciała pacjenta.

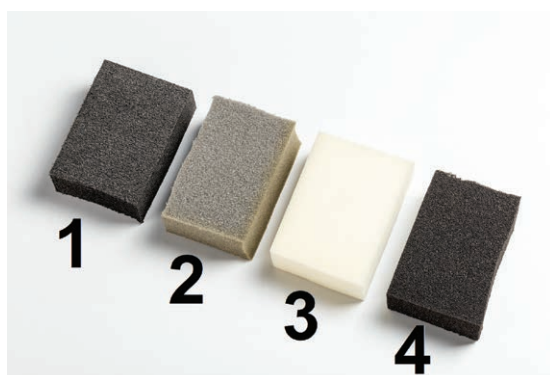
Tego typu narzędzie umożliwia pomiar siły wywieranej przez robota na tkanę w sposób pośred-



Rysunek 7. Narzędzie mechatroniczne z czujnikiem siły znajdującym się w połowie części walcowej narzędzia



Rysunek 8. Stanowisko badawcze sprzężenia siłowego

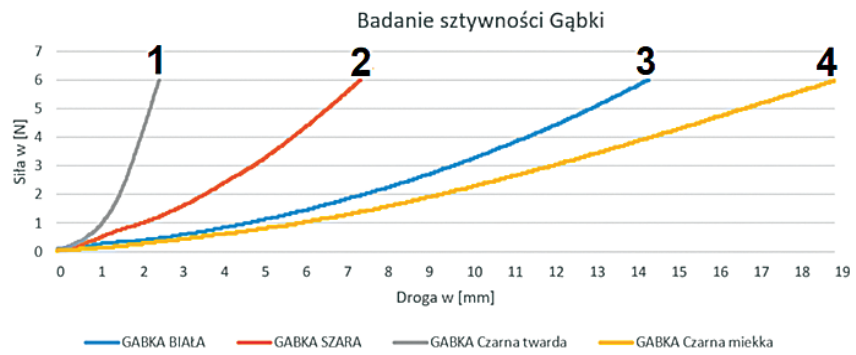


Rysunek 9. Materiały testowe sprzężenia siłowego

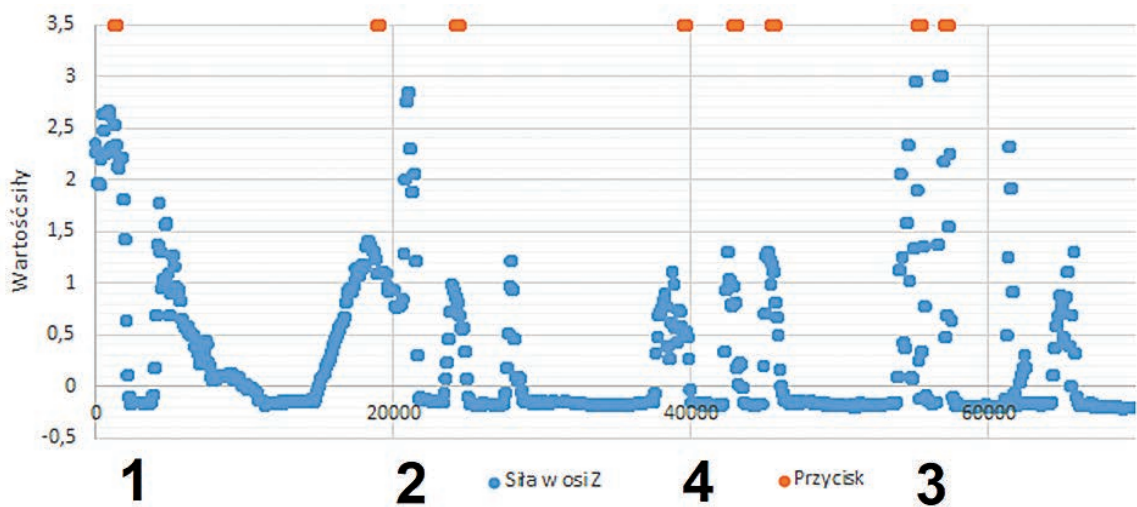
ni. Oznacza to, że siła jest mierzona poprzez pomiar mikro-ugięcia prowadnicy narzędzia, które powstaje w efekcie kontaktu robota z tkanką. W tej konstrukcji narzędzia zastosowano zintegrowany 6-osiowy czujnik siły i momentu marki AIT Industrial Automation NANO 25 komunikujący się z konsolą sterowania za pomocą magistrali CAN.

BADANIA FUNKCYJALNE SYSTEMU SPRZĘŻENIA SIŁOWEGO STANOWISKO BADAWCZE

Na potrzeby badań funkcjonalnych sprzężenia siłowego zostało opracowane i wykonane specjalne stanowisko badawcze (Rys. 8) składające się z:



Rysunek 10. Badanie sztywności materiałów testowych: aparatura badawcza i wyniki testu materiałów



Rysunek 11. Zależność siły [N] generowanej na rękę operatora w osi Z zmiennej w czasie [ms] dla różnych sztywności materiału badanego

- 1 robota Robin Heart DUO, wyposażonego w narzędzie mechatroniczne z czujnikiem siły znajdującym się w połowie rurki narzędzia;
- 2 konsoli sterowania Robin Stiff Flop DUO, wyposażonej w zadajnik ruchu Robin Hand oraz
- 3 trenażera narzędzi endoskopowych (model klatki piersiowej pacjenta).

Wewnątrz trenażera można w odpowiedni sposób przygotować sceny chirurgiczne i badane modele. Na użytek badań opisywanych w pracy przygotowano modele materiałów o różnym stopniu twardości.

PRZYGOTOWANIE MATERIAŁÓW TESTOWYCH

W celu przeprowadzenia badań sprzężenia siłowego przygotowano 4 materiały o różnym stopniu sztywności (Rys. 9). Następnie przy użyciu maszyny pomiarowej z wykalibrowanym czujnikiem siły Mark7 dokonano pomiaru materiałów i uszeregowano je w kolejności według wzrastającej sztywności.

Pomiar polegał na zagłębieniu czujnika maszyny w materiał badany, przy jednoczesnym zapisie położenia oraz siły. Wprowadzono ograniczenie maksymalne siły równe 6 N. Wyniki pomiarów zostały przedstawione na rys. 10.

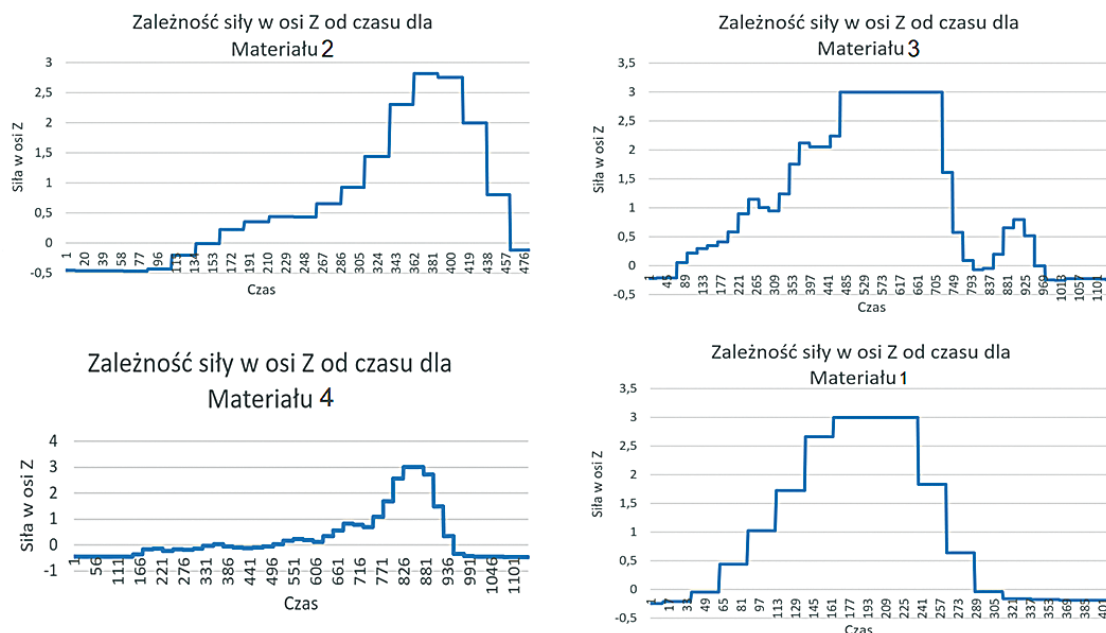
BADANIE FUNKCJONALNE SPRĘŻENIA SIŁOWEGO

Badania funkcjonalne sprzężenia siłowego przeprowadzono na grupie 30 studentów medycyny.

Subiektywne odczucie operatora trzymającego zadajnik ruchu Robin Hand podzielono na:

1. Detekcja powierzchni.
2. Detekcja różnicy sztywności materiału.

Ad 1. Operator przy pomocy zadajnika ruchu Robin Hand wykonuje ruch narzędziem mechatronicznym w osi Z prostopadłej do materiału. Gdy narzędzie wejdzie w kontakt z materiałem badanym



Rysunek 12. Wykresy przedstawiające zależność siły [N] od czasu [ms] dla poszczególnych materiałów.

zostanie wygenerowana siła oddziaływująca na rękę operatora przeciwnie do kierunku ruchu. Siła ta będzie proporcjonalna do sztywności materiału. Operator ma za zadanie nacisnąć przycisk w momencie subiektywnego odczucia minimalnego sprzężenia siłowego (dla każdego z materiałów badanych).

Analizowane są dane: krzywa mierzonej siły podczas ruchu oraz sygnał subiektywnego poczucia zetknięcia z powierzchnią. Badanie ma na celu ocenę minimalnej wartości siły odczuwanej przez operatora.

Ad 2. Operator przy pomocy zadajnika ruchu Robin Hand wykonuje ruch narzędziem mechatronicznym w osi Z analogicznie jak w badaniu pierwszym. Natomiast celem ćwiczenia jest ocena subiektywna sztywności materiału przy pomocy sprzężenia siłowego generowanego na rękę operatora. Operator zagłębia narzędzie mechatroniczne w kolejnych materiałach (Rys. 9), następnie ma za zadanie uszeregować materiały według rosnącej sztywności.

WYNIKI POMIARÓW

Każda z osób biorących udział w ćwiczeniu wykonywała ruchy manipulatorem z narzędziem mechatronicznym wyposażonym w czujnik siły. Efektem styku czujnika z materiałem badanym było generowanie sprzężenia siłowego na rękę operatora. Wynik zarejestrowanych pomiarów siły generowanej za pomocą zadajnika ruchu na rękę operatora przedstawia Rys. 11.

Każdy z materiałów powoduje wygenerowanie innej wartości siły na rękę chirurga w funkcji zagłębiania się w materiał, co umożliwia rozpoznanie

sztywności materiałów. Minimalna siła przy naciśniętym przycisku wynosiła 1,1N. Szczegółowe dane dla każdego materiału przedstawiono na Rys. 12.

Widoczne na wykresach zmiany tempa narastania siły oraz jej wartości odpowiadają różnej sztywności. Odpowiednio: materiał o największej sztywności powoduje najszybszy wzrost siły generowanej na rękę operatora.

PODSUMOWANIE WYNIKÓW

- 30/30 Osób poprawnie odczuwa sprzężenie siłowe oraz wskazała moment styku narzędzia mechatronicznego z materiałem badanym poprzez naciśnięcie przycisku.
- 30/30 Osób poprawnie rozpoznaje materiały o znacznie różniącej się sztywności (materiał 1 oraz 4 z Rys. 10).
- 18/30 Osób poprawnie rozpoznaje wszystkie materiały i potrafi je uszeregować według rosnącej sztywności.

WNIOSKI

Przedstawione badania funkcjonalne sprzężenia siłowego stanowią wstępną ocenę skuteczności subiektywnego odczuwania siły w systemie (zadajnik – robot – sensor siły umieszczony w połowie rurki przewodnicy narzędzia mechatronicznego). Z punktu widzenia konstruktora robota oznacza to, że można w systemie sprzężenia siłowego zastosować czujnik pośrednio mierzący obciążenie narzędzia. Brak konieczności stosowania czujnika o bardzo wysokim stopniu miniaturyzacji znajdującego się na końcu

narzędzia, w podstawowym zakresie działania robota, zmniejsza koszty systemu. Stosowanie sensorów zlokalizowanych bezpośrednio w miejscu działania wprowadza obowiązek zabezpieczenia pacjenta przed ryzykiem porażenia elektrycznego.

Przedstawiono metodykę i wstępne wyniki badań sprzężenia siłowego. Kolejne planowane prace będą związane z testowaniem nowych rozwiązań konstrukcyjnych i nowej lokalizacji sensorów (np. tensometrów umieszczonych w przewodnicy narzędzia mechatronicznego) oraz optymalizacji systemu sprzężenia siłowego pod względem oprogramowania układu sterowania.

System sterowania pozwala na przeskalowanie zakresu ruchu oraz sprzężenia siłowego. Odpowiedni ruch zadajnika ruchu może oznaczać wielokrotnie mniejszy ruch narzędzia. Komfortowa i precyzyjna praca chirurga wymaga również odpowiedniego do wykonywanego zadania przeskalowania efektu siłowego na dłoń chirurga. Wprowadzone parametry przekazania siły na zadajnik ruchu powinny pozwalać na wycucie reakcji narzędzia z tkanką, ale nie blokować kontynuacji wymaganych przez procedurę czynności (o czym decyduje operator). Opisane w publikacji doświadczenie jest przykładem modelowania fizycznego elementów reakcji narzędzia z materiałami i subiektywnej oceny przez wolontariuszy materiałów różniących się sztywnością. System Robin Heart ze sprzężeniem siłowym (wprowadzenie odpowiednich parametrów przeskalowania)

powinien być przygotowywany razem z użytkownikiem do konkretnego typu operacji.

Wdrożenie kliniczne robota ze sprzężeniem siłowym musi zawierać elementy szkolenia i testy na modelach fizycznych pozwalające na ustalenie optymalnych nastaw parametrów kontroli ruchu i sterowania. Optymalnych dla różnych typów operacji i spersonalizowanych, czyli dopasowanych dla określonego chirurga.

■ PODZIĘKOWANIA

Projekt finansowany jest ze środków otrzymanych od Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach programu LIDER /32/0175/L-8/16/NCBR/2017 oraz przez MNiSW jako doktorat wdrożeniowy.

■ BIBLIOGRAFIA

- [1] Robotyka medyczna w Polsce – Zbigniew Nawrat str 7-16 MedRobRep 1,2012
- [2] Krawczyk D., Mucha Ł., Lis K., Nawrat Z.: Robot medyczny Robin Heart Duo – badania funkcjonalne sprzężenia siłowego. Wydawnictwo Naukowe TYGIEL sp. z o.o. 2019 – w druku materiały pokonferencyjne
- [3] Zbigniew Nawrat, Łukasz Mucha, Kamil Rohr, Krzysztof Lis, Krzysztof Lechrich, Dariusz Krawczyk, Péter Földesy, János Radó, Csaba Dücső, Hunor Sántha, Gábor Szabéniyi, Péter Fűrjes : Robin Heart INCITE – wprowadzenie sprzężenia siłowego dla telemanipulatora chirurgicznego. MedRobRep 5, 2016, str 34-42
- [4] Sallé D., Bidaud P., Morel G.: Optimal design of high dexterity modular MIS instrument for coronary artery bypass grafting. Proc. IEEE ICRA 2004, New Orleans, USA, 2004; 2: 1276–1281.
- [5] Rosen J., Brown J.D., Chang L., Barreca M., Sinanan M., Hannaford B.: The BlueDRAGON – a system for measuring the kinematics and the dynamics of minimally invasive surgical tools in-vivo. Proc. IEEE ICRA 2002, Washington, pp. 1876–1881.
- [6] Iwata H.: Pen-based haptic virtual environment. Proc. IEEE Virtual Reality Annual International Symposium, Seattle, USA, 1993.
- [7] Nawrat Z.: Robot chirurgiczny – projekty, prototypy, badania, perspektywy, Rozprawa habilitacyjna, Katowice 2011