

Algorytmy sterowania admitancyjnego i impedancyjnego w robotach medycznych

Admittance and Impedance Control Algorithms in Medical Robots

Artykuł recenzowany

Streszczenie

W pracy przedstawiono zaimplementowane sterowanie admitancyjne i impedancyjne w systemie robotycznym, który może być wykorzystany w zabiegach chirurgicznych w środowisku laboratoryjnym. System ten składa się z robota KUKA LWR oraz konsoli haptycznej Force Dimension Omega 7. W ramach prowadzonych prac badawczych przeprowadzono szereg badań eksperymentalnych weryfikujących zastosowane algorytmy sterowania.

Abstract

This paper presents implemented admittance and impedance control in a robotic system that can be used in surgical procedures in a laboratory environment. This system consisted of a KUKA LWR robot and Force Dimension Omega 7 haptic console. As part of the research, a number of experimental studies were carried out to verify the control algorithms used.

**PIOTR SAUER^{1*},
TOMASZ KRZYKOWSKI²**

¹Institut Automatyki i Robotyki,
Politechnika Poznańska,
60-965 Poznań, ul. Piotrowo 3a
²CUBE SYSTEMS Sp. z o.o.
ul. Św. Michała 58, Poznań

* piotr.sauer@put.poznan.pl

Słwa kluczowe:

robot medyczny, konsola haptyczna, sterowanie admitancyjne, sterowanie impedancyjne, chirurgia wspomagana komputerowo, chirurgia robotyczna.

Keywords:

medical robot, haptic console, admittance control, impedance control, computer-assisted surgery, robotic surgery.

WPROWADZENIE

Gwałtowny rozwój inżynierii biomedycznej i bio-cybernetyki przyczynił się do opracowania nowych metod leczenia i diagnostyki medycznej opartej na obrazowaniu medycznym.

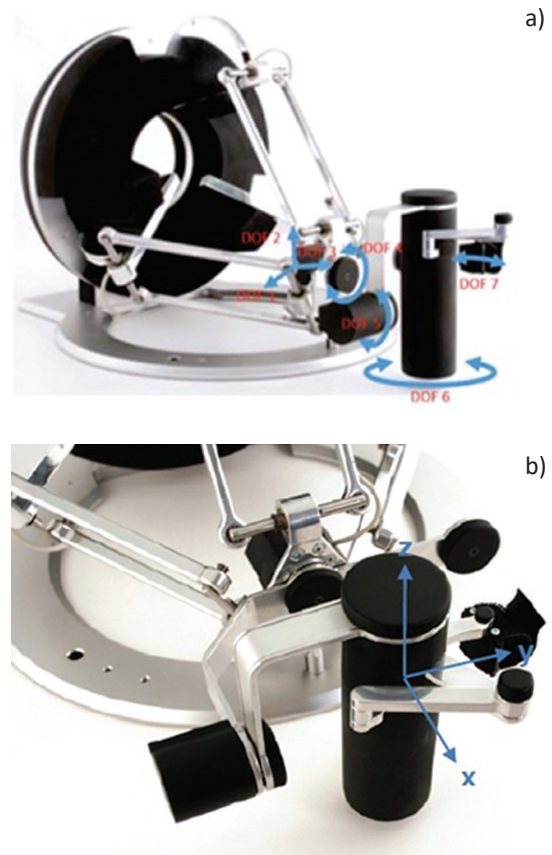
Połączenie nowoczesnych technik obrazowania z systemem nawigacyjnym przyczyniło się do powstania chirurgii wspomaganej komputerowo (CAS – ang. *Computer Assisted Surgery*) [1, 2, 3]. Rozwój technologii i metod operacyjnych przyczynił się do wprowadzenia technik małoinwazyjnych, które z jednej strony umożliwiają skrócenie czasu hospitalizacji po zabiegu a z drugiej strony są trudniejsze do opanowania przez lekarza. Jedną z takich technik jest chirurgia laparoskopowa określana również jako chirurgia minimalnie inwazyjna (MIS – ang. *Minimally Invasive Surgery*). Jest ona techniką operacyjną, w której chirurg nie kontaktuje się bezpośrednio z operowaną tkanką lecz obserwuje pole operacji na ekranie monitora. Rozwój informatyki

umożliwił opracowanie nowej odmiany chirurgii laparoskopowej określanej mianem „telechirurgii”, w której uzyskany obraz mógł być przesyłany na odległość. Zastosowanie „telechirurgii” umożliwiło częściowe rozwiązanie problemu rosnącego zapotrzebowania na specjalistyczną pomoc medyczną, która wynika ze zbyt małej ilości lekarzy oraz personelu medycznego. Początkowo „telechirurgia” była techniką pasywną czyli umożliwiała przeprowadzanie konsultacji medycznych na odległość. Kolejny rozwój inżynierii dał możliwość chirurgom aktywnego uczestniczenia w operacji na odległość przy pomocy robotów chirurgicznych (RAS – ang. *Robotically Assisted Surgery, Robotic Surgery*) [3, 4, 5, 6]. Szczegółowo zaplanowany ruch i zwiększona dokładność prowadzenia narzędzia przez roboty sprawia, że leczenie jest bezpieczniejsze a czas hospitalizacji po zabiegu krótszy [7]. W ostatnich latach na podstawie raportu [7] widać znaczący wzrost zainteresowania robotyką medyczną. Jednak należy pamiętać, że lic-

ne korzyści płynące z zastosowania robotów są ściśle zależne od umiejętności prawidłowego i pełnego wykorzystania sprzętu przez operatora. Doświadczeni lekarze niechętnie rezygnują z wyćwiczonych i sprawdzonych metod tradycyjnych, na rzecz odmiennych w sterowaniu, a czasem nawet nieintuicyjnych metod sterowania robotem. Wykonywanie zabiegu przy wykorzystaniu robotów chirurgicznych wymaga nauczenia się sterowania narzędziem z wykorzystaniem ograniczonych bodźców zmysłowych. Jednym ze zmysłów ograniczanych przez konstrukcję robota i zadajnika ruchu jest zmysł dotyku. Faktura, twardość i sprężystość badanej tkanki, są kluczowymi cechami, wpływającymi na ocenę stawianą przez lekarza. Odwzorowanie tych cech jest możliwe, jeśli zastosowany zostanie specjalny zadajnik haptyczny, czyli taki, który umożliwia oddziaływanie siłą na rękę operatora. W celu uzyskania efektu zmysłu dotyku, interakcję narzędzia chirurgicznego (np. skalpela) z otoczeniem (np. tkanką pacjenta) opisuje się modelem masa-sprężyna-tłumik. Model ten umożliwi przedstawienie sprężystości i tłumienia nacisku narzędzia na tkankę. Wykorzystuje się go w odpowiednim algorytmie sterowania, który łączy sterowanie pozycyjne ze sterowaniem siłowym. W prezentowanej pracy zaproponowaliśmy dwa algorytmy sterowania: sterowanie admitancyjne i impedancyjne. Algorytmy te zostały zaimplementowane w systemie robotycznym składającym się z robota KUKA LWR 4+ i konsoli haptycznej Force Dimension Omega 7. Następnie przedstawione w pracy algorytmy zostały zweryfikowane w warunkach laboratoryjnych.

■ KONSOLA HAPTyczna OMEGA 7

Konsola haptyczna Omega 7 firmy Force Dimension (Rys. 1) jest precyzyjnym zadajnikiem ruchu z możliwością zaimplementowania sprzężenia siłowego. Zapewnia operatorowi instynktowną i bezpieczną pracę. Charakteryzuje się siedmioma stopniami swobody oraz układem dla prawo- i leworęcznych użytkowników [8,9]. Można połączyć oba kontrolery w jeden system i wykorzystać pełnię możliwości interfejsów haptycznych. Konsola została zbudowana na bazie kinematyki równoległej połączonej z dołączonym ruchomym nadgarstkiem (efektorem) oraz chwytakiem ze sprzężeniem siłowym. Zadajnik został wyposażony w trzy złącza pasywne (ruch w nadgarstku) oraz cztery złącza wyposażone w silniki (tzw. złącza aktywne, trzy złącza związane z kinematyką równoległą - pozycja końcówki narzędzia, a czwarte złącze aktywne umożliwia otwieranie i zamykanie narzędzia). Wszystkie złącza posiadają sprzężenie enkoderowe umożliwiające dokładne śledzenie zadawania ruchu. Zastosowanie czterech złącz aktywnych pozwala zrealizować sprzężenie siłowe od pozycji końcówki narzędzia oraz od stop-



Rysunek 1. Konsola haptyczna Omega 7: a) widok konsoli, b) efektor z układem bazowym. [9, 10]

Figure 1. Omega 7 haptic console: a) console view, b) an effector with a base system. [9, 10]

nia otwarcia narzędzia. Effektor konsoli został zrealizowany jako połączenie par przegubowych, które umożliwiają odwzorowanie naturalnego ruchu ludzkiego nadgarstka. Wysoka sztywność mechaniczna połączona z pracującym w czasie rzeczywistym kontrolerem USB 2.0 pozwala na generowanie sygnałów wykonawczych dla silników urządzenia z częstotliwością osiągającą nawet 4kHz. Właściwości konsoli haptycznej umożliwiają jej zastosowanie w projektach z takich dziedzin jak [8]:

- robotyka medyczna i lotnicza,
- mikro- i nanomanipulatory,
- konsole teleoperacyjne,
- wirtualne symulatory,
- systemy treningowe.

Konsola haptyczna Omega 7 charakteryzuje się następującymi parametrami [8,10]:

- przestrzeń robocza: $\phi 160 \times 110$ mm, obrót: $240 \times 140 \times 180^\circ$, szczypce: 25 mm,
- maksymalna siła: 12 N, szczypce: ± 8 N,
- rozdzielczość: $< 0,01$ mm, obrót: $0,09^\circ$, szczypce: 0,006 mm,
- sztywność: 14,5 N/mm,

ROBOT KUKA LWR 4+

Robot KUKA LWR (Lightweight robot) jest nową generacją robotów manipulacyjnych wyposażonych w sterowanie momentem. Powstał on jako rezultat współpracy Instytutu Robotyki i Mechaniki (German Aerospace Center – DLR) z firmą KUKA Roboter GmbH. W odróżnieniu od klasycznych robotów przemysłowych, robot KUKA LWR jest lekkim elastycznym robotem o 7 stopniach swobody (Rys. 2), który posiada następujące własności:

- bardzo dobry współczynnik wagi robota do masy przenoszonego ładunku, robot KUKA LWR 4+ jest przeznaczony do przenoszenia ładunku o masie 7 kg, sam waży 15 kg,
- generowanie ruchu robota, w celu osiągnięcia zadanej pozycji zdefiniowanej w przestrzeni kartezjańskiej lub przestrzeni złącz,
- możliwość symulowania sprężyn ze zmienną sztywnością zarówno w przestrzeni złącz jak i w przestrzeni kartezjańskiej,
- kompensacja wpływu grawitacji, robot przenosi swój własny ciężar i może być przesuwany pod wpływem działania sił zewnętrznych na ramię robota (możliwość ręcznego prowadzenia robota),
- estymacja zewnętrznych sił i momentów sił działających na chwytak robota oraz każde jego złącze,
- sterowanie z kontrolą położenia, prędkości i momentu obrotowego. Pomiar pełnego stanu we wszystkich złączach wykonywany jest w cyklu 3 kHz.

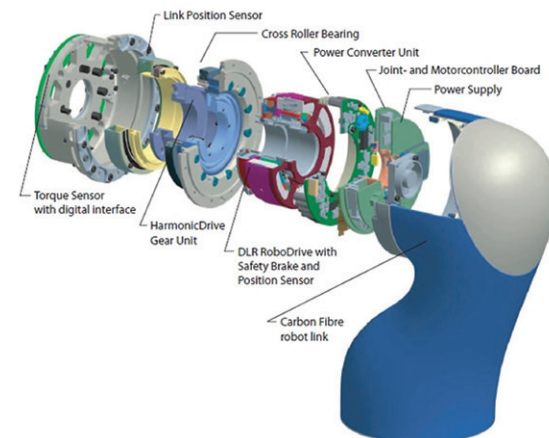
Dzięki w/w własnościom uzyskano dynamiczny system z aktywnym tłumieniem drgań, który może pracować w bezpośrednim kontakcie z człowiekiem. Robot ten zbudowany jest z „inteligentnych” modułów (złącz), w które wbudowano systemy elektroniczne w tym również systemy pomiarowe. Każde złącze robota wyposażono w następujące elementy (Rys. 3) [12]:

- bezszczotkowy silnik DC z zintegrowanym mostkiem mocy oraz elektromagnetycznymi hamulcami,
- przekładnię harmoniczną,
- czujnik położenia wału silnika (enkodery magnetooporowe),
- czujnik położenia złącza (potencjometry),
- czujnik momentów sił, który montowany jest na elastycznym elemencie przekładni harmoniczej. Błąd czujnika wynosi poniżej 0,5% i zastosowano filtr dolnoprzepustowy przy 600Hz, zasilacz,
- płytę sterownika zawierającą dwa procesory sygnałowe DSP, pierwszy (TMS320VC33) odpowiedzialny jest za komunikację z zewnętrznym sterownikiem robota, obsługuje czujników



Rysunek 2. Robot KUKA LWR 4+ ze sterownikiem i panelem KCP (KUKA Control Panel) [11]

Figure 2. KUKA LWR 4+ robot with controller and KCP panel (KUKAControl Panel) [11]



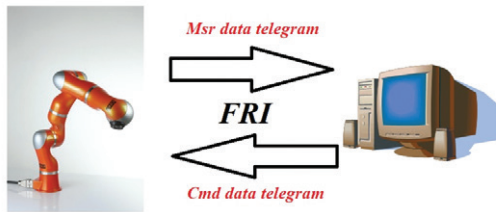
Rysunek 3. Moduł napędowy robota KUKA LWR 4+ [12]

Figure 3. KUKA LWR 4+ robot drive module [12]

oraz wyznaczanie aktualnych poleceń dla procesora silnika, drugi (DSP56F807) jest sterownikiem silnika, oblicza pozycję i prędkość silnika, umożliwia pomiar temperatury, prądu pobieranego przez silnik oraz obsługuje sygnały z czujników Halla zamontowanych w silniku,

- cienkie łożyska toczne.

System sterowania umożliwia wykorzystanie funkcji ze sterownika KUKA i zintegrowanego języka skryptowego KRL (KUKA Robot Language) podobnie jak w przypadku robotów przemysłowych firmy KUKA. Język programowania KRL został rozszerzony o funkcje takie jak kontrola impedancji (nie jest dostępna dla standardowych robotów). W sterowniku robota zastosowano interfejs FRI (ang. *the Fast Re-*



Rysunek 4. Zastosowanie interfejsu FRI (komunikacja między sterownikiem robota, a zewnętrznym komputerem)

Figure 4. Application of FRI (communication between robot controller and external computer)

search Interface), który umożliwia dostęp do sterowania robotem na tzw. niskim poziomie z częstotliwością 1 kHz [11]. Interfejs FRI umożliwia połączenie sterownika robota z aplikacją zaimplementowaną na zewnętrznym komputerze z dowolnym systemem operacyjnym dzięki zastosowaniu protokołu internetowego UDP (ang. *User Datagram Protocol*) – Rys. 4.

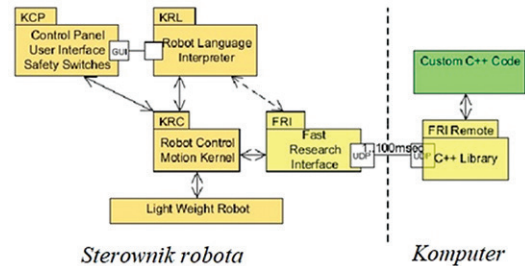
Komunikacja między sterownikiem robota, a zewnętrznym komputerem wykorzystuje dwa telegramy [13]:

- **Msr data telegram** – zawiera informacje o stanie robota (np. *Robot state* – informacja o robocie) oraz wartości mierzone (np. *Robot data* – zmierzona pozycja w złączach lub w układzie kartezjańskim), telegram wysyłany jest ze sterownika robota do komputera,
- **Cmd data telegram** – zawiera nagłówek informacji (zgodny z UDP), informację o wybranym trybie pracy (np. instrukcje interfejsu FRI) oraz informacje niezbędne dla języka KRL (np. wartość zadania pozycji w złączach lub w układzie kartezjańskim). Telegram przesyłany z komputera do sterownika robota.

Interfejs FRI zapewnia również normalne funkcjonowanie kontrolera robota KUKA czyli [11]:

- standardowe programowanie i obsługę robota,
- realizację standardowych poleceń ruchu takich jak LIN/PTP/CIRC,
- wybór trybów sterowania (sterowanie pozycją lub impedancyjne),
- pełne działanie systemów bezpieczeństwa,
- współpracę z magistralą I/O,
- korzystanie z wbudowanego w sterownik języka KRL (ang. *KUKA Robot Language*).

Współpraca między sterownikiem robota a aplikacją na komputerze PC umożliwia użytkownikowi pełną autonomię. Z punktu widzenia użytkownika sterowanie robotem, wybór trybu sterowania, edytowanie i wykonywanie programów (skryptów) napisanych w języku KRL. Jądro systemu sterowania ruchem robota KUKA dostarcza różnych metod generowania trajektorii ruchu (PTP, LIN, CIRC) za



Rysunek 5. Architektura systemu sterowania z interfejsem FRI [11]

Figure 5. Architecture of the control system with FRI interface [11]

pomocą prostych komend języka KRL. Interfejs FRI umożliwia bezpośrednie oddziaływanie na jądro systemu sterowania ruchem. Generowana trajektoria przesyłana jest do komputera PC, gdzie może być modyfikowana przez użytkownika. Za pomocą FRI użytkownik może również modyfikować parametry sztywności i tłumienia niezbędne dla sterowania impedancyjnego lub wymagane momenty sił w poszczególnych złączach. W tym celu część interfejsu uruchamiana jest w sterowniku robota KUKA, a od strony użytkownika dostępna jest biblioteka FRI zawierająca odpowiednie funkcje sterujące zaimplementowane za pomocą języka C++ (Rys. 5).

ALGORYTMY STEROWANIA PORÓWNANIE STEROWANIA IMPEDANCYJNEGO I ADMITANCYJNEGO

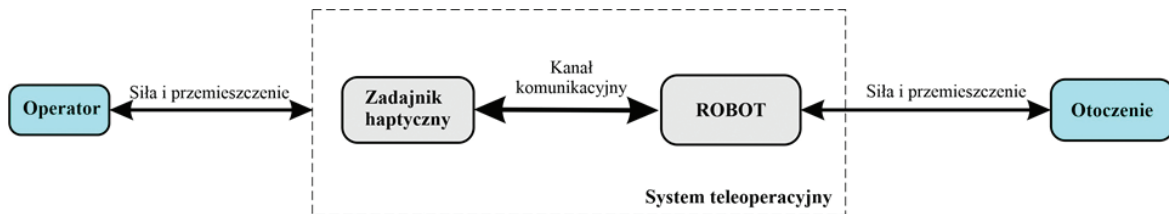
W chirurgii robotycznej wykorzystuje się systemy teleoperacyjne, w których ruch zadawany przez operatora (lekarza) działającego na zadajnik jest przesyłany odpowiednim kanałem komunikacyjnym do elementu wykonawczego (robota medycznego). Na rysunku 6 przedstawiono schemat blokowy systemu teleoperacyjnego. W nowoczesnych systemach teleoperacyjnych wykorzystuje się specjalne zadajniki ruchu (tzw. zadajniki haptyczne), które wykorzystują siłowe sprzężenie zwrotne aby operator mógł odczuwać kontakt narzędzia chirurgicznego z operowaną tkanką. Aby było to możliwe należy rozwiązać problem połączenia sterowania położeniem narzędzia z oddziaływaniem tego narzędzia na otoczenie (np. operowaną tkankę).

Jeżeli założymy że narzędzie robota porusza się w środowisku punktów inercyjnych, które reprezentowane są za pomocą masy m , a współczynników sprężystości k i tłumienia c określają właściwości kontaktu narzędzia robota z otoczeniem to otrzymujemy układ mechaniczny [14]. Układ ten można opisać następującym równaniem:

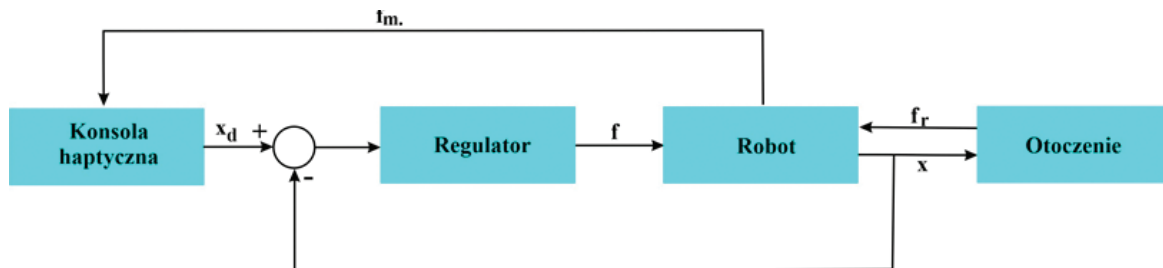
$$f = m\ddot{x} + c\dot{x} + kx \quad (1)$$

gdzie: f – siła działająca na układ mechaniczny,

x – przemieszczenie układu mechanicznego,



Rysunek 6. Schemat blokowy systemu teleoperacyjnego
 Figure 6. Block diagram of the teleoperational system



Rysunek 7. Schemat blokowy sterowania admitancyjnego (gdzie: f – regulowana wartość siły, f_r – siła reakcji otoczenia na przemieszczenie narzędzia, f_m – siły działające na narzędzie robota wyznaczone na podstawie danych z układów pomiarowych robota, x_d – zadana wartość przemieszczenia narzędzia robota, x – wyjściowe przemieszczenie narzędzia robota),
 Figure 7. Block diagram of admittance control (where: f – control the force, f_r – reaction force to the movement of the tool, f_m – force acting on the robot tool determined on the basis of data from robot measuring systems, x_d – the set value of robot tool displacement, x – robot tool displacement)

- m – masa,
- k – współczynnik sprężystości,
- c – współczynnik tłumienia.

Dla robota znajdującego się w nieznanym środowisku można rozpatrzyć dwa przypadki jego oddziaływania na otoczenie:

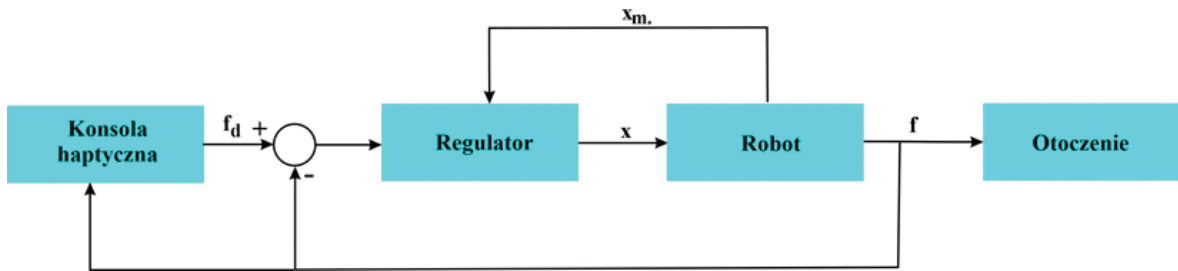
- ramię robota traktowane jest jako sztywny układ mechaniczny, natomiast jego otoczenie jest zbiorem punktów inercyjnych opisanych równaniem (1),
- otoczenie robota traktowane jest jako sztywne punkty, natomiast ramię robota jest układem mechanicznym podatnym, który jest opisany równaniem (1).

Zatem narzędzie zamontowane w chwytaku robota może wywierać siłę na otoczenie lub poruszać się w nim, jednakże nigdy nie można jednocześnie sterować wartością wywieranej siły i wartością przemieszczenia [14, 15]. Jeśli przyjmiemy, że narzędzie robota charakteryzuje się małą inercją, a zadanie wymaga szczególnej kontroli siły z jaką narzędzie działa na otoczenie, wówczas manipulator należy traktować jako obiekt o charakterze impedancyjnym, a środowisko jako zbiór obiektów inercyjnych. Narzędzie robota jest szczególnie wrażliwe na skutki działania siły wynikające z kontaktu z otoczeniem. Regulacja siły interakcji pozwala na pełną kontrolę sił działających w układzie. Kosztem wysokiej jakości regulacji siłowej jest brak bezpośredniego wpływu na przemieszczenie narzędzia w środowisku. Kontrola położenia możliwa jest jedynie pośrednio

poprzez dodatkowe pętle sprzężenia zwrotnego. Przykładem może być oddziaływanie szczypec na tkankę miękką podczas operacji laparoskopowej, w którym istotna jest siła oddziaływania narzędzia na ludzką tkankę, a nie jej rzeczywiste dokładne przemieszczenie. Natomiast gdy założymy, że narzędzie charakteryzuje się dużą inercją, a zadanie teleoperacji ma polegać na osiągnięciu konkretnej pozycji, wówczas manipulator należy traktować jako obiekt o charakterze inercyjnym, a środowisko jako obiekt o charakterze admitancyjnym. Podążanie narzędzia za trajektorią zadaną jest możliwe poprzez zastosowanie pętli regulacji pozycji, które uwzględniają jego inercję. Kosztem tego sterowania jest brak możliwości bezpośredniej predykcji siły z jaką manipulator musi oddziaływać na otoczenie, aby osiągnąć zadaną pozycję. Przykładem może być frezowanie kości udowej w celu dopasowania protezy ortopedycznej. W tym przypadku istotne jest dokładne przygotowanie powierzchni kości do kształtu protezy. Dokładność pozycjonowania frezu podczas operacji przekłada się na końcowe efekty dopasowania protezy [16].

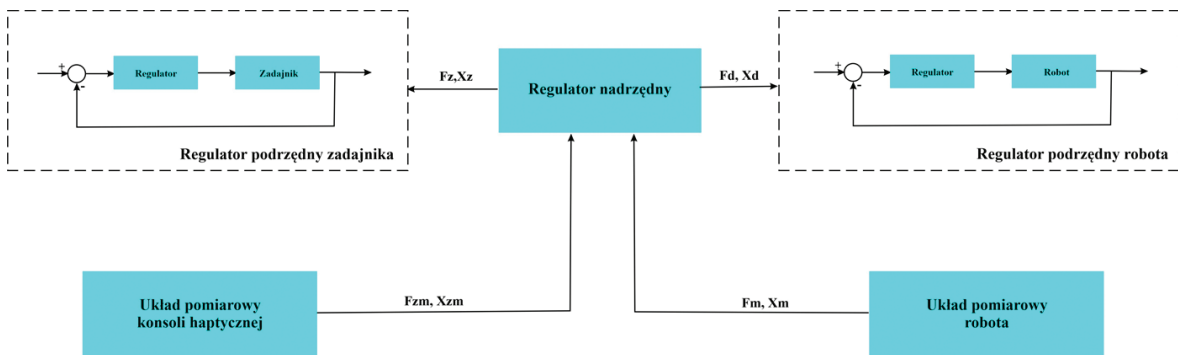
Ostatecznie można zdefiniować ogólne dwa typy sterowania:

- **sterowanie admitancyjne** czyli sterowanie pozycyjne, w którym narzędzie manipulatora traktuje się jako obiekt inercyjny. Obiekt ten pod wpływem generowanej w złączach siły przemieszcza się do pozycji zadanej. Regulator na podstawie sprzężenia zwrotnego od aktu-



Rysunek 8. Schemat blokowy sterowania impedancyjnego (gdzie: x – regulowana wartość przemieszczenia narzędzia robota, x_m – zmierzona wartość przemieszczenia narzędzia, f_d – zadana wartość siły oddziaływującej na środowisko)

Figure 8. Block diagram of impedance control (where: x – adjustable value of robot tool displacement, x_m – measured value of tool displacement, f_d – set value of the force affecting the environment)



Rysunek 9. Schemat blokowy sterowania kaskadowego z dodatkowymi układami pomiarowymi (gdzie F_z – zadana wartość siły, która poprzez efektor konsoli działa na rękę operatora, X_z – zadane przemieszczenie efektora zadajnika, F_m , X_m – wartości siły i przemieszczenia mierzone za pomocą układów pomiarowych zadajnika, F_d – zadana wartość siły z jaką działa narzędzie na otoczenie, X_d – zadana wartość przemieszczenia narzędzia, F_m , X_m – wartości siły i przemieszczenia mierzone za pomocą układów pomiarowych robota)

Figure 9. Block diagram of cascade control with additional measuring system (where: F_z – set value of force, which through the console effector works on the operator's hand, X_z – set displacement of the effector, F_m , X_m – values of force and displacement measurement by the console system, F_d – set value of the force with which the tool works on the environment, X_d – set value of tool displacement, F_m , X_m – values of force and displacement measured by robot measuring systems)

alnej pozycji, ustala siłę z jaką robot powinien działać na otoczenie. Bezpośrednią reakcją na przemieszczenie narzędzia manipulatora jest siła reakcji otoczenia. W przypadku systemów teleoperacyjnych siłę reakcji otoczenia odwzorowuje się na siłę z jaką działa efektor konsoli haptycznej na rękę operatora. Rysunek 7 przedstawia schemat blokowy sterowania admitancyjnego.

● **sterowanie impedancyjne** czyli sterowanie siłowe, w którym manipulator działa na zbiór punktów inercyjnych, działających na narzędzie z siłą zależną od ich przemieszczenia. Regulator na podstawie sprzężenia zwrotnego od wywieranej siły, ustala położenie zadane obiektowi, tak aby uzyskać nacisk na otoczenie z zadaną siłą. Rzeczywiste przemieszczenie narzędzia robota jest zależne od właściwości środowiska, w którym się porusza i nie jest równe zadanej wartości przemieszczenia narzędzia. Na rysunku 8 przedstawiono schemat blokowy sterowania impedancyjnego.

Podsumowując, w sterowaniu admitancyjnym, sprzężenie siłowe stosuje się w celu generowania siły działającej na rękę operatora. Siła ta odwzorowuje opór jaki może pojawić się w czasie oddziaływania narzędzia na otoczenie. W tym przypadku w zadajniku nie jest wymagane aktywne sprzężenie siłowe, można zastosować odpowiedni hamulec do generowania oporów ruchu. Możliwe jest zastosowanie aktywnego sprzężenia siłowego i przeniesienie na zadajnik sił aktywnie działających na efektor w momencie bezruchu. Natomiast w sterowaniu impedancyjnym sprzężenie siłowe stosuje się w celu przenoszenia na zadajnik operatora wszystkich sił działających na narzędzie. Operator pokonując siły generowane przez zadajnik, kontroluje siłę z jaką narzędzie działa na otoczenie. W tym przypadku wymagane jest stosowanie aktywnego sprzężenia siłowego, gdyż siły będące skutkiem interakcji efektora z otoczeniem powinny być przenoszone na konsolę haptyczną tak aby operator mógł odczuwać wszystkie siły działające w układzie.

W praktyce kompletny system sterowania admitancyjnego lub impedancyjnego wymaga kaska-

dowej struktury układu regulacji. W skład ogólnej architektury wchodzi wysokopoziomowy regulator nadrzędny (np. regulator pozycji) oraz regulatory podrzędne, działające na coraz niższych poziomach abstrakcji. Ostatni niskopoziomowy regulator podrzędny zawsze odpowiada za fizyczne działanie sprzętu i odnosi się do konkretnych wartości rzeczywistych takich jak wartości prądu w uzwojeniach silnika i/lub napięcia podawanego na uzwojenia silnika. Regulator nadrzędny wykorzystuje sygnały pomiarowe odpowiednie dla rodzaju sterowania. W przypadku sterowania admitancyjnego podstawowym sygnałem pomiarowym jest pozycja narzędzia, natomiast w sterowaniu impedancyjnym sygnałem podstawowym jest siła działająca na narzędzie. Zatem do prawidłowego działania sterowania a tym samym zadajnika wymagane jest zastosowanie dodatkowych układów pomiarowych. Na rysunku 9 przedstawiono schemat blokowy sterowania kaskadowego dla realizacji zadania teleoperacji. W przedstawionym układzie zastosowano dodatkowe układy pomiarowe.

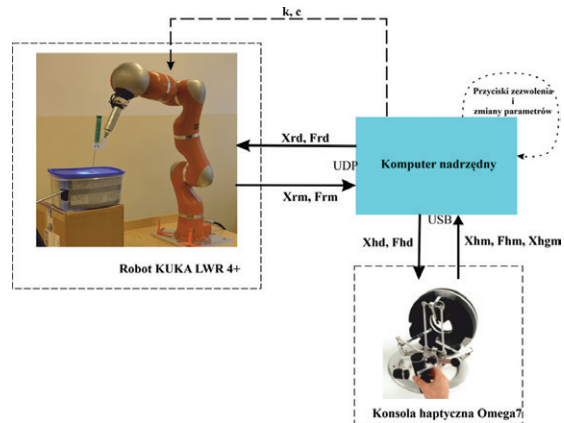
IMPLEMENTACJA ALGORYTMÓW STEROWANIA

Przedstawione powyżej algorytmy sterowania zaimplementowano w laboratoryjnym systemie robotycznym, który symulował działanie robota medycznego. Badania laboratoryjne posłużyły do weryfikacji eksperymentalnej algorytmów sterowania, które można zastosować dla robotów wspomagających przeprowadzanie zabiegów chirurgicznych. Stanowisko laboratoryjne składało się z następujących modułów (Rys. 10):

- konsoli haptycznej Omega 7 firmy Force Dimension,
- robota przemysłowego KUKA LWR4 +,
- komputera, na którym zaimplementowano przedstawione algorytmy sterowania, komputer realizuje również komunikację między robotem a konsolą haptyczną. Do komunikacji między komputerem, a robotem zastosowano protokół UDP wykorzystując bibliotekę FRI. Natomiast do komunikacji między komputerem a konsolą haptyczną wykorzystano interfejs USB oraz bibliotekę FD (Force Dimension Haptic – SDK).

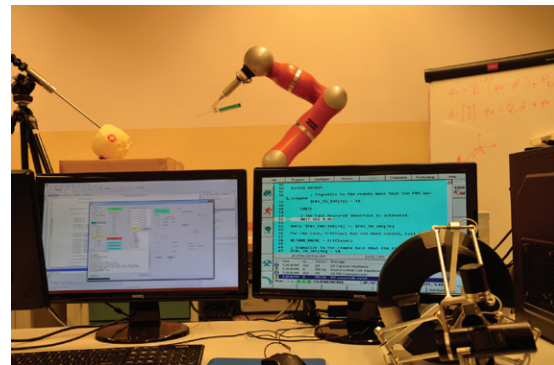
Rysunek 11 przedstawia widok stanowiska laboratoryjnego, na którym testowano zaimplementowane w pracy algorytmy sterowania.

Przedstawione w rozdziale 4.1 algorytmy sterowania zaimplementowano w aplikacji napisanej w języku C++. Aplikację ta pełni rolę mastera, a konsola haptyczna i robot są urządzeniami typu slave. Istnieje możliwość włączania lub wyłączania sprzężenia siłowego odczuwalnego na konsoli haptycznej.



Rysunek 10. Schemat blokowy stanowiska badawczego (gdzie: Xhd, Fhd – zadane wartości pozycji i siły oddziaływania konsoli haptycznej, Xhm, Fhm – zmierzone wartości pozycji i siły oddziaływania konsoli haptycznej, $Xhgm$ – zmierzona pozycja szczytów konsoli haptycznej, Xrd, Frd – zadane wartości pozycji i siły oddziaływania robota, Xrm, Frm – zmierzona wartość pozycji i siły oddziaływania robota).

Figure 10. A block diagram of experimental set-up (where: Xhd, Fhd – set values of the position and force of the haptic console, Xhm, Fhm – measured values of the position and force of the haptic console, $Xhgm$ – measured position of the haptic console pliers, Xrd, Frd – set values of the position and force of the robot, Xrm, Frm – measured value of robot position and impact)



Rysunek 11. Widok stanowiska laboratoryjnego
Figure 11. View of the experimental set-up.

Podczas pracy przy włączonym sprzężeniu siłowym operator odczuwa siły kontaktu narzędzia z tkanką poprzez siły, które są generowane przez efektor konsoli na rękę operatora. W trakcie pracy istnieje możliwość zmiany właściwości robota za pomocą zmian wartości współczynników sprężystości i/lub tłumienia w poszczególnych złączach. W wyniku zmian wartości w/w współczynników można uzyskać zmianę impedancji lub admitancji całego układu mechanicznego. Sterowanie admitancyjne zrealizowane jest poprzez implementację pętli pozycyjnej, w której wartością zadaną jest aktualna pozycja efektora konsoli haptycznej. Operator na podstawie sprzężenia siłowego działającego na jego rękę steruje pozycją efektora zadajnika. Wyznaczo-

ne wartości zadane są przetwarzane przez aplikację, a następnie przesyłane do robota, w którym realizowany jest dojazd do pozycji zadanej. Jeśli manipulator porusza się w środowisku generującym opory ruchu, wówczas sterownik robota umożliwia pomiar sił oporu w poszczególnych złączach. Następnie w sterowniku robota następuje przeliczenie pomierzonych sił w złączach na siłę oporu działającą na końcówkę narzędzia. Następnie obliczone w sterowniku robota siły zostają odczytane w opracowanej aplikacji i przesłane do konsoli haptycznej.

Sterowanie impedancyjne zostało zrealizowane poprzez implementację pętli siłowej, w której wartością zadaną jest przeskalowana siła zmierzona na konsoli haptycznej. Przy starcie algorytmu efektor konsoli ustawiany jest automatycznie w pozycji centralnej. Jeśli operator odsunie zadajnik z pozycji zerowej, konsola zacznie przeciwdziałać, wywierając siłę w takim kierunku aby efektor zadajnika powrócił do pozycji zerowej. Siła reakcji generowana przez konsolę jest proporcjonalna do wielkości wychylenia efektora od pozycji zerowej. Dzięki takiemu rozwiązaniu operator odchylając zadajnik od pozycji zerowej może zadawać siłę z jaką narzędzie działa na otoczenie. W sterowaniu impedancyjnym narzędzie robota traktowane jest jako punkt nieważki, więc po zadaniu przez operatora ruchu z określoną siłą, narzędzie będzie poruszało się tak długo aż natrafi na przeszkodę, stawiającą opór z siłą równą sile zadanej. Wszystkie siły działające na narzędzie robota są dodawane do siły, która centruje efektor konsoli. Dlatego w przypadku natrafienia na przeszkodę, operator odczuwa na konsoli haptycznej opór stawiany przez przeszkodę. Jeśli narzędzie robota dotyka niepodatnej powierzchni nieruchomej, wówczas siła odchylenia zadajnika haptycznego od pozycji zerowej w kierunku powierzchni nieruchomej będzie rosła do maksimum.

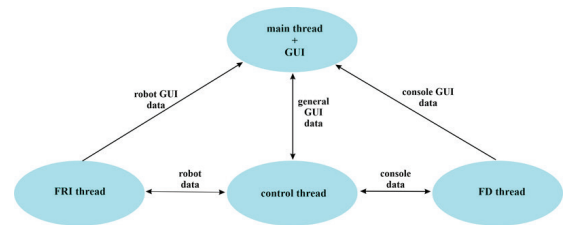
Aplikacja obsługuje następujące wątki:

- *main thread* – wątek główny odpowiada za sterowanie i bezpieczne kończenie pracy wątków pomocniczych oraz obsługuje interfejs użytkownika,
- *FRI thread* – wątek obsługujący komunikację z robotem KUKA LWR,
- *FD thread* – wątek obsługujący komunikację z konsolą haptyczną,
- *control thread* – wątek realizujący pracę regulatora nadrzędnego.

Zależności pomiędzy poszczególnymi wątkami przedstawiono na rysunku 12.

W aplikacji utworzono trzy odrębne klasy:

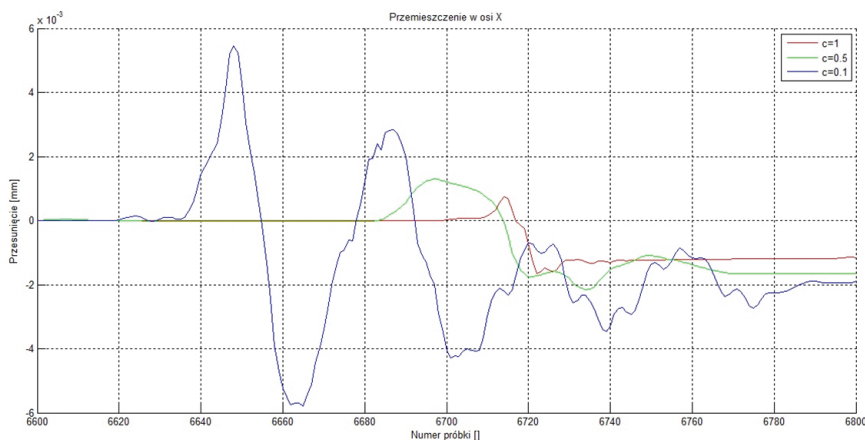
- *Telemanipulation_system* – klasa zawierająca obsługę interfejsu graficznego, metodę *update()* zawierającą główną pętlę programu oraz punkt wejściowy programu czyli metodę *main()*,



Rysunek 12. Relację między poszczególnymi wątkami aplikacji
Figure 12. The relationship between individual application threads

- *FDHandler* – klasa zawierająca obsługę biblioteki *FD SDK*,
- *FRIHandler* – klasa zawierająca obsługę *FRI*.

Aplikacja umożliwiać jednoczesną obsługę wszystkich bibliotek pomocniczych przy zachowaniu regularnej synchronizacji danych między poszczególnymi wątkami programu. Wymagania biblioteki *FRI* dotyczące czasów odpowiedzi programu są bardzo rygorystyczne. Biblioteka *FRI* do komunikacji z robotem KUKA LWR wykorzystuje protokół *UDP*, który nie umożliwia ciągłego monitorowania połączenia w bieżącej sesji, dlatego konieczne było wykorzystanie dodatkowych mechanizmów do cyklicznego sprawdzania poprawności połączenia z robotem. Ustawiona pętla synchronizacji połączenia między komputerem i robotem zakłada nawiązanie kontaktu między urządzeniami co 1 ms. Aplikacja została napisana w środowisku *Windows*, który nie jest systemem czasu rzeczywistego, dlatego możliwe jest zaniedbywanie narzuconych programowo czasów odświeżania głównej pętli, jeśli inne aplikacje systemowe uzyskają większy priorytet. Niedotrzymanie ustalonych czasów synchronizacji wiąże się z zatrzymaniem programu robota i zerwaniem połączenia. W celu zabezpieczenia się przed zerwaniem komunikacji z robotem zastosowano dodatkowy pomocniczy wątek, obsługujący tylko bibliotekę *FRI*. Wszystkie metody wykorzystywane przez ten wątek zostały umieszczone w klasie *FRIHandler*. Implementacja obsługi komunikacji z robotem została umieszczona w metodzie *FRIHandler::update()*. Każda iteracja pętli *update()* wymusza aktualizację poszczególnych parametrów, jeśli od czasu ostatniej iteracji zostały one zmodyfikowane przez inny wątek. W celu zapewnienia komunikacji z konsolą haptyczną stworzono osobny wątek obsługujący bibliotekę *FD SDK*. Podobnie jak w przypadku wątku *FRI*, implementacja obsługi interfejsu urządzenia została umieszczona w jednej pętli aktualizującej poszczególne parametry w każdej iteracji. Wątek pomocniczy *control thread* działa niezależnie od pozostałych części aplikacji i wykorzystuje klasę główną *telemanipulation_system*. Wątek ten wykonuje następujące zadania:



Rysunek 13. Wpływ zmiany admitancji na pozycjonowanie narzędzia (gdzie c - współczynnik tłumienia, zgodny z równaniem (1))

Figure 13. Impact of admittance change on tool positioning (where: c - damping factor according to equation (1))

- odczytuje aktualne siły działające na narzędzie robot,
- odczytuje aktualną pozycję i orientację narzędzia robota,
- odczytuje aktualną pozycję oraz siły działające na efektor konsoli haptycznej,
- sprawdza czy przycisk zezwolenia jest wciśnięty (wciśnięcie przycisku umożliwia poruszanie narzędzia robota za pomocą ruchu efektora konsoli),
- odczytuje i przekazuje do wątków pomocniczych nowe wartości sił i pozycji robota oraz konsoli haptycznej,
- sprawdza czy przyciski zmiany parametrów są wciśnięte,
- zapisuje aktualne dane do pliku tekstowego w celu ewentualnego późniejszego przetwarzania,
- ustawia flagę synchronizującą heartbeat dla wątków pomocniczych.

W zależności od wybranego trybu możliwe jest sterowanie robotem w trybie admitancyjnym lub impedancyjnym. W obu trybach sterowania zdecydowano się na przeniesienie sił zmierzonych przez układy pomiarowe robota na konsolę haptyczną jako sprzężenie zwrotne dla operatora.

■ BADANIA EKSPERYMENTALNE

W ramach prowadzonych badań przeprowadzono szereg testów działania algorytmów sterowania. Dokładny opis testów przedstawiono w pracy [14]. Podczas realizacji badań zauważono, że zmiana wartości współczynników sprężystości oraz tłumienia robota przekłada się na zmianę dokładności pozycjonowania narzędzia podczas pracy w trybie admitancyjnym. W trakcie sterowania admitancyjnego wywierana jest odpowiednia siła przesuująca narzędzie manipulatora do pozycji zadanej. W przypadku napierania siłą na narzędzie charakteryzujące się dużą podatnością, część energii jest roz-

praszana na elementach sprężystych jak i tłumiących. Nierozproszona część energii zgromadzona w elementach sprężystych jest oddawana z opóźnieniem. W przypadku zastosowania stałego wymuszenia, zmniejszenie admitancji jest widoczne poprzez opadanie narzędzia w polu grawitacyjnym. W celu uwydatnienia efektu opadania, nieruchome narzędzie zostało ręcznie i jednorazowo wprowadzone w drgania, pozwalające przezwyciężyć tarcie statyczne w złączach manipulatora. Efekt przedstawiono na rysunku 13.

Porównując początkową i końcową pozycję narzędzia skierowanego pionowo w dół, można zauważyć, że w przypadku stosowania małej wartości współczynnika tłumienia c narzędzie znacząco opada.

■ PODSUMOWANIE

W przedstawionej pracy, poprawnie zrealizowano aplikację pozwalającą na sterowanie robotem za pomocą konsoli haptycznej. Zaimplementowany wielowątkowy program odpowiada za przetwarzanie sygnałów i sterowanie ruchem obu urządzeń. Aplikacja zapewnia prosty w formie konsoli, interfejs użytkownika umożliwiający zmianę podstawowych parametrów działania systemu. Zastosowanie sterowania admitancyjnego zostało uznane za bardzo korzystne rozwiązanie w przypadku konieczności przemieszczania narzędzia z dużą dokładnością. Dzięki wzbudzeniu pętli głównej programu co 1 ms uzyskano bardzo wysoką jakość nadążania robota za zadajnikiem haptycznym. W przypadku pozycjonowania i przemieszczania narzędzia, opóźnienie pętli komunikacyjnej jest niemal nie zauważalne. Niestety ze względu na pomiar sił tylko w złączu i przeliczaniu ich wartości na siły działające na końcówkę narzędzia, zaimplementowane sprzężenie haptyczne charakteryzuje się słabą jakością odwzorowaniem kontaktu narzędzia ze środowiskiem. W przypadku szybkich, impulsowych ruchów system nie pozwala na poprawne oszacowanie miejsca styku narzędzia

ze środowiskiem. Znacznie lepsze efekty można obserwować, jeśli narzędzie prowadzone jest powoli i płynnie. Z drugiej strony zaimplementowane sterowanie impedancyjne pozwala na efektywne kontrolowanie siły nacisku narzędzia na środowisko. Dzięki zastosowaniu odpowiedniego ułożenia konsoli haptycznej oraz odwzorowaniu sił działających na narzędzie robota w trybie sterowania impedancyjnego możliwe jest prowadzenie narzędzia w dowolnym kierunku ze stałą siłą. Ze względu na właściwości algorytmu nie jest możliwe dokładne pozycjonowanie narzędzia bez dodatkowej zewnętrznej pętli sprzężenia zwrotnego. Dodatkowe funkcje skalowania i zmiany admitancji oraz impedancji robota pozwalają na dokładne dopasowanie właściwości systemu do wybranego zadania.

LITERATURA

- [1] Schlöndorff G., Mösges R., Meyer-Ebrecht D., Krybus W., Adams L., CAS (Computer Assisted Surgery), HNO, 37, s. 187-190, 1989.
- [2] Reinhardt H., Meyer H., Amrein E., A computer assisted device for the intraoperative CT-controlled localization of brain tumours, EurSurgRes, 20, s. 51-58.
- [3] Piątkowski K., Sauer P., Zastosowanie metod chirurgii wspomaganą komputerowo (CAS) w otolaryngologii – chirurgii głowy i szyi, Otolaryngologia Polska, tom LVIII, 5, s. 1027-1033, 2004.

- [4] Sauer A., Aspekty naukowe, techniczne i ekonomiczne zastosowania robotyki w medycynie, praca dyplomowa magisterska, Politechnika Poznańska, 2007.
- [5] Waliszewski W., Telesurgery and Robotics on Tomorrow's Surgery, Materiały konferencyjne The Second International Workshop on Robot Motion and Control, RoMoCo'01, Bukowy Dworek, s. 151-152, 2001.
- [6] Sauer P., Kozłowski K., Waliszewski W., Michalski M., Kietczewski M., Pazderski D., Jeziorek P., ASYSTENT – Control System Assisting Surgeon in Laparoscopy, Biocybernetics and Biomedical Engineering, Vol. 6, No. 4, s. 55-70, 2006.
- [7] K. Krocze. Rynek robotów medycznych, Medical Robotics Reports 2015 4:61-64.
- [8] Force Dimension, Omega.7 Haptic Device Force Feedback Interface (www.forcedimension.com)
- [9] Force Dimension, User Manual Omega.x Haptic Device Version 1.6 (www.forcedimension.com)
- [10] Ł. Mucha, Interfejs użytkownika robota – przegląd urządzeń zadawania ruchu systemów sterowania telemanipulatorów, Medical Robotics Reports vol. 4, 2015, s.39-48 (ISSN 2299-7407).
- [11] G. Schreiber, A. Stemmer, R. Bischoff, The Fast Research Interface for the KUKA Lightweight Robot, Materiały ICRA 2010 Workshop on Innovative Robot Control Architectures for Demanding (Research) Applications, p.15 – 21, 2010.
- [12] Albu-Schäffer A. i inni, The DLR Lightweight Robot – Design and Control Concepts for Robots in Human Environments, Industrial Robot – an International Journal, 34 (5), pp. 376-385. 2007.
- [13] KUKA.FastResearchInterface 1.0 For KUKA System Software 5.6 Ir, KUKA Roboter GmbH.
- [14] T. Krzykowski, System sterowania manipulatorem w zastosowaniach medycznych, praca dyplomowa magisterska, Politechnika Poznańska, 2018.
- [15] N. Hogan, Impedance Control: An Approach to Manipulation: Part I – Theory, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol. 107, 1985, s. 1-7.
- [16] A. Peer, Design and Control of Admittance – Type Telemanipulation System.

KOMENTARZ RECENZENTA...

Krzysztof Mianowski, dr inż., Politechnika Warszawska

W artykule autorzy poruszają bardzo istotny i aktualny problem dotyczący prowadzenia nowoczesnych operacji małoinwazyjnych z użyciem robotów chirurgicznych związany z „manualnym odczuwaniem przez operatora na dłoniach/palcach/skórce fizycznych właściwości obiektu poprzez telemanipulacyjny system robotyczny”. Praca ma charakter doświadczalny, badania doświadczone przeprowadzono z wykorzystaniem rzeczywistego robota komercyjnego przystosowanego do prowadzenia operacji chirurgicznych współpracującego z typowymi zadajnikami typu haptic device, które pozwalają na odtworzenie na uchwytach zadajników trzymanyh w dłoniach operatora przeskalowanych dynamicznych interakcji siłowych z obszaru styku narzędzie wykonawcze – tkanka operowana.

Paweł Kostka, dr hab. inż. Prof PŚI

Praca dotyczy nowatorskiej koncepcji sterowania admitancyjnego i impedancyjnego, zamodelowanego w kilku wariantach i zaimplementowanego na poziomie instalacji laboratoryjnej do testów, w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. Przedstawione na rys. 13 wyniki eksperymentu nadążania za zadaną pozycją, w testach przy zmieniającej się admitancji obiektu, świadczą o poprawnej koncepcji, implementacji i doborze parametrów układu regulacji, zarówno w warstwie sprzętowej jak i programowej algorytmu.