

PREDYKCYJNA METODA WYZNACZANIA SIŁY W SIŁOWYM SPRZĘŻENIU ZWROTNYM W SYSTEMIE ZDALNIE STEROWANYM

Mateusz Saków^{1a}, Arkadiusz Parus^{1b}, Karol Miądlicki^{1c}

¹InstituT Technologii Mechanicznej, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

^amateusz.sakow@zut.edu.pl, ^barkadiusz.parus@zut.edu.pl, ^ckarol.miadlicki@zut.edu.pl

Streszczenie

W artykule został przedstawiony schemat sterowania bezczujnikowego systemu zdalnie sterowanego z siłowym sprzężeniem zwrotnym wykorzystujący model odwrotny, którego sygnał wyjściowy i wejściowy przewidywany jest przez bloki predykcyjne. W ramach prowadzonych prac została także przedstawiona metoda, która pozwala na oszacowanie stałych czasowych bloków predykcyjnych. Metoda predykcji sygnału wejściowego oraz wyjściowego modelu została zaprojektowana, aby poradzić sobie ze zjawiskami opóźnień transportowych i przesunięć fazowych spowodowanych przez obiekty rzeczywiste. Przedstawione rozwiązanie jest alternatywą dla wykorzystania skomplikowanych nieliniowych modeli, których analiza stabilności jest utrudniona, oraz wymagają wykorzystania układów obliczeniowych dużej mocy. Efektywność metody zweryfikowano na hydraulicznym stanowisku badawczym.

Słowa kluczowe: siłowe sprzężenie zwrotne, zdalne sterowanie, zdalna manipulacja, modelowanie odwrotne

PREDICTIVE METHOD OF FORCE DETERMINATION IN THE FORCE-FEEDBACK COMMUNICATION CHANNEL OF REMOTELY CONTROLLED SYSTEM

Summary

In the paper a sensor-less control scheme for a bilateral teleoperation system with a force-feedback based on a prediction of an input and an output of an inverse model by prediction blocks was presented. As a part of the work a method of a time coefficient estimation of the prediction block was also presented. The prediction method of an input and an output of an inverse model was designed to minimize the effect of the transport delay and the phase shift of sensors, actuators and mechanical objects. The solution is an alternative to complex non-linear models, which involve a difficult stability analysis and require control systems with high computing power. The effectiveness of the method has been verified on the hydraulic test stand.

Keywords: force-feedback, remote control, telemanipulation, inverse modeling

1. WSTĘP

Systemy zdalnie sterowane odgrywają bardzo ważną rolę w dzisiejszych czasach, ponieważ znalazły zastosowanie niemal w każdej gałęzi przemysłu. Próżno jest szukać zakładów pracy, w których brak jest urządzenia sterowanego pilotem, joystickiem czy klawiaturą. Jednak urządzenia zdalnie sterowane nie musi ograniczać się jedynie do wykonywania zaprogramowanego prostego i nieskomplikowanego zestawu poleceń [18].

Od lat 60. ubiegłego wieku trwają badania, które mają zapewnić urządzeniom zdalnie sterowaną [6, 5, 36] lub częściowo autonomiczną pracę [7, 15, 31, 39]. Podział na zdalnie sterowane i autonomiczne urządzenia został

zaproponowany, gdy określono graniczną wartość opóźnienia w kanale komunikacyjnym systemów zdalnie sterowanych, która ma bardzo istotny wpływ na stabilność oraz jakość pracy całego systemu [31]. W układach ciągłych podstawowych systemów sterowania system zazwyczaj staje się niestabilny, gdy opóźnienie w zamkniętej pętli sprzężenia przekroczy wartość połowy cyklu dowolnej częstotliwości pracy dla wzmocnienia pętli większego od jedności [31]. Okazuje się jednak, że sama odległość nie jest jedynym składnikiem sumarycznego opóźnienia w kanałach komunikacyjnych. Na sumaryczne opóźnienie składają się m.in. czas potrzebny na przetworzenie wartości analogowej na cyfrową prze-

twornika A/C, czas dokonania obliczeń przez program sterownika rozumiany jako cykl jego pracy, ponowne przetworzenie sygnału cyfrowego na analogowy w przetworniku C/A, a także stany przejściowe obiektów mechanicznych reprezentowane przez ich dynamiczne parametry [31].

Wiele wartościowych artykułów naukowych zostało poświęconych budowie schematów sterowania oraz opracowaniu metod kontroli, które zapewnią stabilną pracę oraz przeciwdziałają skutkom opóźnień w systemach zdalnie sterowanych [5, 13, 14, 22]. Jednymi z pierwszych metod stabilizujących pracę systemów obustronnego działania Master-Slave były strategie kontroli manipulatora Master. Dwie strategie opracowane przez W. R. Ferrela polegały na dyskretyzacji ruchu operatora oraz na celowym spowolnieniu ruchu przy zbliżaniu się do obiektu środowiska przez podatny metalowy palec oklejony tensometrem [5]. Strategie kontroli podsystemu Master jednak nie dawały tak dobrych wyników pod względem czasu ukończenia zadań przez operatora, jak adaptacyjne schematy sterowania [22]. Schemat sterowania oparty na bezpośrednim przekazywaniu wartości siły z czujnika, opracowany w [5], został rozwinięty przez W. S. Kima o dodanie współdzielonej kontroli zgodności, która polegała na wprowadzaniu podatności w konstrukcji manipulatora Master [14]. Ten sam autor zaproponował także nowy schemat sterowania oparty na obustronnym sterowaniu siłą, na podstawie uchybu pozycji pomiędzy podsystemami Slave oraz Master [13, 14], który znacząco poprawił dokładność przekazywanej siły w siłowym sprzężeniu zwrotnym. Niestety, żaden z tych schematów sterowania nie gwarantował stabilnej pracy systemu dla opóźnień w kanale komunikacyjnym wynoszącym więcej niż kilkanaście mili sekund. Dopiero modyfikacja kanału komunikacyjnego, która wykorzystywała zmienne falowe, pozwoliła na całkowite ustabilizowanie pracy systemów obustronnego działania [30]. W późniejszym czasie zmienne falowe zostały rozbudowane o układy sterowania wewnętrznie pasywne [1]. Znaczącą poprawę odwzorowania wartości siły w siłowym sprzężeniu zwrotnym przyniosło jednak zwiększenie liczby kanałów komunikacyjnych z dwóch [6, 5, 7, 13, 14] do czterech [8, 16]. W czterokanałowym schemacie sterowania przesyłane z podsystemu Master do Slave były w obydwu kierunkach informacje o sile oddziaływania operatora/środowiska oraz pozycja konkretnych przegubów manipulatora Master/Slave [8, 16]. Czterokanałowy schemat sterowania został również wyposażony w adaptacyjny układ regulacji kontrolujący równolegle siły w systemie oraz pozycje poszczególnych manipulatorów [38].

XXI wiek to domena implementacji algorytmów sterowania opartych na regulatorach z przesuwym horyzontem [10, 20, 21], logice rozmytej [4], separacji częstotliwości w kanale siłowego sprzężenia zwrotnego [2, 24], specjalnych metodach dyskretyzacji rozdzielczości czujników opartych na traktowaniu systemów jako ciągło-dyskretnych [9], sztucznych sieci neuronowych [34], a

nawet stosowaniu adaptacyjnych regulatorów dedykowanych do systemów obustronnego działania z niesymetrycznym opóźnieniem w kanale komunikacyjnym, które zostały uzupełnione o adaptacyjne metody filtracji [41, 42].

Należy jednak zwrócić uwagę na to, że systemy zdalnie sterowane posiadają trzy różne rodzaje sprzężenia zwrotnego z operatorem: sprzężenie zwrotne wizyjne [7, 31], sprzężenie zwrotne siłowe (czuciowe) [5] oraz kombinację sprzężenia zwrotnego wizyjno-siłowego [3, 8, 13, 14, 34, 35, 43]. Zdalnie sterowane systemy mogą być sterowane za pomocą skanerów ruchu kończyn [6, 5, 7, 13, 28, 31], w szczególnym przypadku będących egzozskioletami kończyn górnych [28] i dłoni [43], za pomocą gestów [19, 23], a także stosując komendy głosowe [32, 33]. Sterowanie gestem lub komendami głosowymi pozwala jednak jedynie na zastosowanie wizyjnego sprzężenia zwrotnego pomiędzy manipulatorem a człowiekiem.

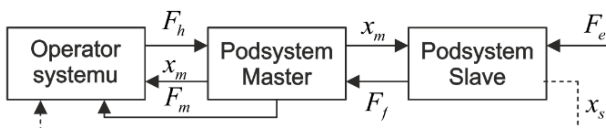
Ważnym podziałem systemów zdalnie sterowanych obustronnego działania z siłowym sprzężeniem zwrotnym jest podział, który dzieli urządzenia na wykorzystujące pomiar siły [2, 5, 14, 24] oraz bezczujnikowe [12, 27, 28, 34, 37]. Grupa bezczujnikowa wykorzystuje głównie modele odwrotne oparte na strukturach sztucznych sieci neuronowych [34], nieliniowych modelach autoregresyjnych z egzogennym wejściem [28], a także mikromanipulatorach, które wykorzystują procesy odwrotne zachodzące w piezokryształach [12, 25-27].

Systemy zdalnie sterowane obustronnego działania Master-Slave z siłowym sprzężeniem zwrotnym niewątpliwie zajmują jedną z przyszłościowych gałęzi rozwoju robotyki. Stanowi o tym wiele nowych prac, które stale rozwijają telemanipulatory. Dotychczas większość systemów bezczujnikowych opartych na modelach odwrotnych wykorzystywała nieliniowe metody estymacji wartości siły w kanale siłowego sprzężenia zwrotnego [28, 34], aby poradzić sobie ze zjawiskami tarcia, opóźnień transportowych i przesunięć fazowych.

W niniejszym artykule przedstawiono schemat sterowania bezczujnikowego systemu zdalnie sterowanego z siłowym sprzężeniem zwrotnym, oparty na modelu odwrotnym, którego sygnał wyjściowy, jak i wejściowy wyznaczany jest za pomocą bloków predykcyjnych. W ramach prowadzonych prac została także przedstawiona metoda, która pozwala na oszacowanie stałych czasowych bloków predykcyjnych. Strukturę bloków predykcyjnych opracowano na podstawie układów regulacji z predykcją, które wykorzystują schematy sterowania oparte na Predyktorze Smitha [11, 17]. Opracowana struktura została zaimplementowana w kanale siłowego sprzężenia zwrotnego systemu obustronnego działania manipulatora hydraulicznego o jednym stopniu swobody. Wyniki tego eksperymentu potwierdziły efektywność przedstawionej metody.

2. ZDEFINIOWANIE PROBLEMU

Problemem przy wykorzystaniu modeli odwrotnych w układach sterowania jest zawsze występujące pewne opóźnienie pomiędzy „przyczyną” a „skutkiem” [31]. Istnieją rozwiązania, które pozwalają na kompensację wpływu opóźnień transportowych i przesunięć fazowych powodowanych przez napędy, obiekty oraz czujniki pomiarowe w kanale komunikacyjnym [41, 42]. Niniejsza praca przedstawia rozwiązanie problemu wykorzystania modeli odwrotnych w układach sterowania, jednak wykorzystuje efektywną obliczeniowo metodę opartą na liniowych elementach automatyki, w przeciwieństwie do rozwiązań z obecnej literatury naukowej [41, 42]. Przedstawiona metoda minimalizuje skutki opóźnień powstających już w układzie sterowania podsystemu Slave oraz tych opóźnień pochodzących od obiektów w torze napędowym i pomiarowym podsystemu Slave. Schemat systemu Master-Slave z siłowym sprzężeniem zwrotnym przedstawiono na rys.1.



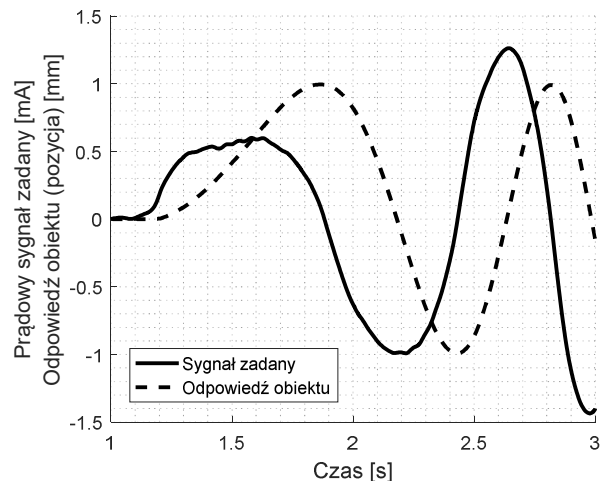
Rys. 1. Analizowany system Master-Slave

W analizowanym systemie (rys. 1) występują trzy charakterystyczne składniki: operator systemu, który zmienia pozycję skanera ruchu – podsystemu Master, oddziałując siłą F_h . Podsystem Master przekazuje informację do podsystemu Slave o swojej aktualnej pozycji x_m . Podsystem Slave dąży do tego, aby pozycja $x_s = x_m$. W siłowym sprzężeniu zwrotnym F_f system przekazuje wartość oddziaływania środowiska F_e na manipulator Slave. Drugim zadaniem skanera ruchu jest przekazanie informacji o oddziaływaniu siłowego środowiska z kanału komunikacyjnego $F_f \approx F_e$. W teoretycznym przypadku $F_m = F_e$ [28]. W praktyce model nigdy nie odzwierciedla obiektu rzeczywistego z nieskończoną dokładnością, dlatego $F_m \approx F_e$, o której dokładności decyduje model odwrotny urządzenia.

W analizowanym systemie mogą wystąpić trzy sprzężenia zwrotne, w których przekazywane są informacje operatorowi: sprzężenie siłowe zwrotne, sprzężenie wizyjne pozycji skanera (podsystemu Master) oraz sprzężenie wizyjne pozycji podsystemu Slave. Sprzężenie zwrotne wizyjne pomiędzy podsystemem Slave a operatorem może wystąpić jedynie wtedy, gdy przekazywany jest obraz za pomocą kamer na znacznych dystansach lub podsystem Slave znajduje się w bezpośrednim sąsiedztwie operatora.

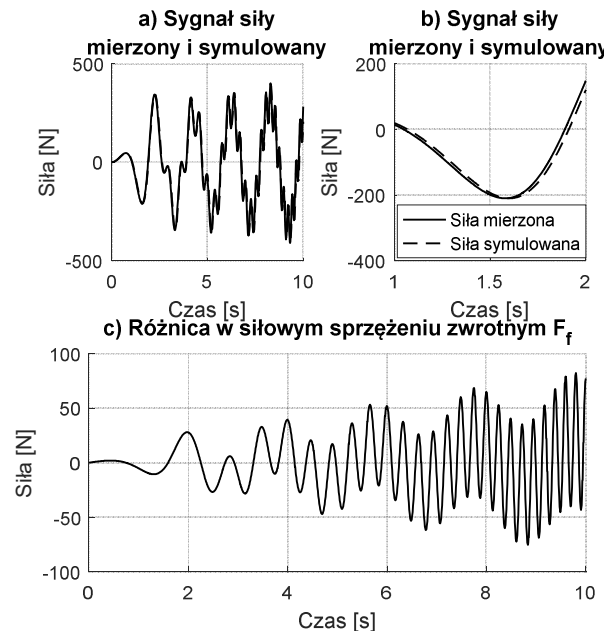
Problem sumarycznego opóźnienia jest szczególnie widoczny przy wyznaczaniu odpowiedzi obiektów rzeczywistych na sygnał zadany. Pomiary wartości zadanej oraz odpowiedzi, które zostały przeprowadzone na

stanowisku badawczym, jednoznacznie przedstawiają opóźnienie transportowe, które jest zauważalne w przedziale pomiaru od 1,1s do 1,2s na przebiegu odpowiedzi obiektu (rys. 2).



Rys. 2. Przykład opóźnień transportowych oraz przesunięcia fazowego wywołanego przez napęd, obiekt oraz czujnik pomiarowy

Na rys. 2 zauważalne jest także przesunięcie fazowe, którego główną przyczyną jest sam obiekt, ale również napęd i układ pomiarowy. W rzeczywistości żaden czujnik pomiarowy ani napęd nie posiada funkcji przejścia charakteryzującej się wyłącznie parametrem wzmocnienia, dlatego również sam czujnik pomiarowy w znaczący sposób przesuwają w czasie sygnał wejściowy modelu odwrotnego.



Rys. 3. Zniekształcenie sygnału siłowego sprzężenia zwrotnego przez opóźnienia transportowe oraz przesunięcia fazowe

Użycie modelu odwrotnego obiektu opartego na różniczkowych równaniach ruchu wiązałoby się w tym przypadku ze znacznym przesunięciem w czasie sygnału wyliczonego przez model odwrotny względem mierzonego

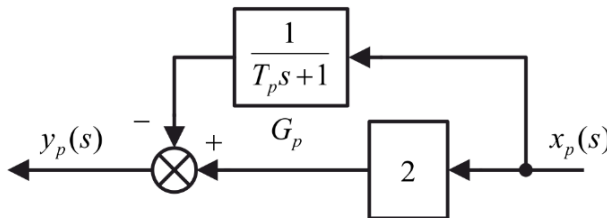
sygnału zadanego pochodzącego z układu sterowania. Powstałe przesunięcie fazowe skutkuje katastrofalnym zniekształceniem wartości sił w siłowym sprzężeniu zwrotnym, nawet podczas ruchu swobodnego manipulatora Slave (rys. 3).

Przebieg różnicy sił mierzonych oraz symulowanych F_f (rys. 3c) przedstawia, jak opóźnienie sumaryczne na poziomie 10ms jest w stanie zniekształcić wartość siły w siłowym sprzężeniu zwrotnym. Z pozoru nieznaczne przesunięcie sygnału w czasie (rys. 3a), powiększone (rys. 3b), może doprowadzić do całkowitego zaburzenia pracy systemu. Jest to zjawisko, które nasila się w miarę wzrostu częstotliwości sygnału odpowiedzi obiektu. Zaburzenia wartości siły w kanale komunikacyjnym może zatem skutkować znacznymi przekłamaniami co do wartości siły oddziaływania środowiska przekazywanej operatorowi, a nawet utratą stabilności całego systemu.

3. BLOK PREDYKCYJNY

Dokonując analizy układów sterowania przedstawionych w poprzednich pracach, gdzie wykorzystany był nieliniowy model autoregresyjny z egzogennym wejściem [28] oraz model odwrotny z predykcją jego wejścia oraz wyjścia [29], opracowano metodę szacowania stałej czasowej obiektu predykcyjnego T_p .

Blok predykcyjny opracowano na podstawie struktur Predyktorów Smitha przedstawianych w literaturze [11, 17]. Blok posiada strukturę przedstawioną na rys. 4.



Rys. 4. Blok predykcyjny

Transmitancją zastępczą, którą charakteryzuje się blok predykcyjny, opisaną przez stosunek sygnału wyjściowego $y_p(s)$, do sygnału wejściowego $x_p(s)$ jest (1):

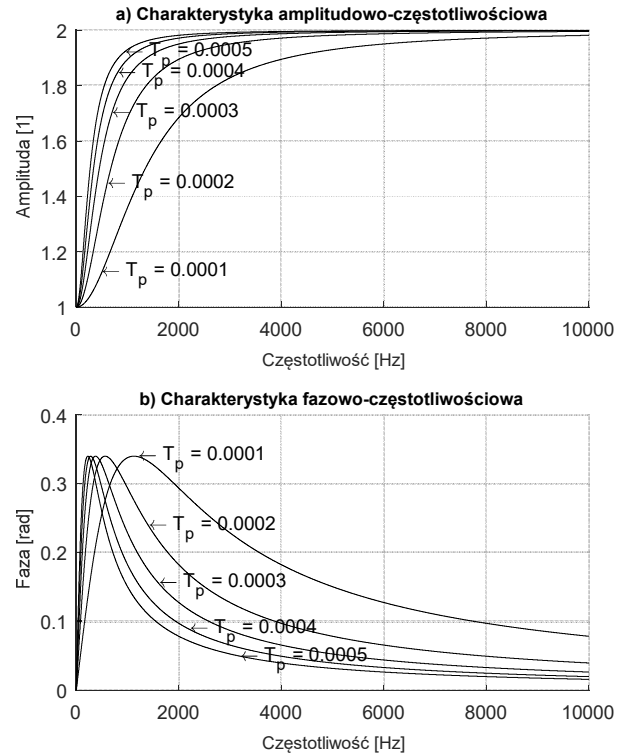
$$\frac{y_p(s)}{x_p(s)} = \frac{2T_p s + 1}{T_p s + 1}, \quad (1)$$

gdzie s jest operatorem Laplace'a.

Dokonując analizy transmitancji bloku predykcyjnego w dziedzinie częstotliwości, należy zwrócić uwagę na charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe (rys. 5a) oraz fazowo-częstotliwościowe (rys. 5b).

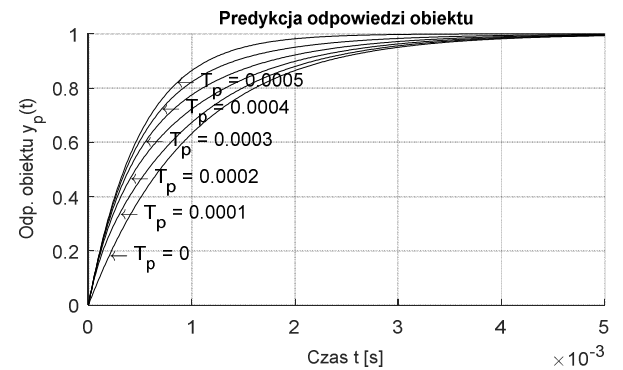
Charakterystyki częstotliwościowe potwierdzają różnicujący charakter bloku. Blok predykcyjny w zależności od wielkości stałej T_p jest w stanie odpowiednio szybko przesunąć sygnał w fazie o dodatnią wartość w funkcji częstotliwości tego sygnału (rys. 5b). Kosztem przesunięcia w fazie o dodatnią wartość jest przeregulowanie

sygnału charakterystyczne dla Predyktora Smitha [11, 17]. Przeregulowanie jest szczególnie zauważalne, gdy stała czasowa T_p została dobrana na zbyt wysokim poziomie w stosunku do częstotliwości sygnału wejściowego bloku predykcyjnego $x_p(s)$.



Rys. 5. Charakterystyki częstotliwościowe bloku predykcyjnego

W dziedzinie czasu blok predykcyjny może wyznaczać wartość wejściową sygnału $x_p(t)$ z pewnym wyprzedzeniem zależnym od stałej czasowej T_p . Zdolność predykcyjną sygnału potwierdzają charakterystyki odpowiedzi skokowej obiektu inercyjnego pierwszego rzędu o stałej czasowej $T=0,001$, którego predykcyjną odpowiedź wyliczana jest przez blok predykcyjny (rys.6).



Rys. 6. Predykcyjny sygnał w dziedzinie czasu

W zależności od stałej czasowej T_p możliwe jest odpowiednio wcześniejsze określenie wartości sygnału wejściowego bloku predykcyjnego $x_p(t)$. Należy jednak zauważyć, że sam blok jest wrażliwy na dwa czynniki: zakłócenia oraz zmiany znaku pochodnej sygnału wejściowego $x_p(t)$. Amplituda niefiltrowanych zakłóceń

zostanie zwiększona przez blok predykcyjny maksymalnie dwukrotnie, ze względu na wzmocnienie równe 2 w bloku predykcyjnym. Zmiana znaku pochodnej sygnału wejściowego $x_p(t)$ spowoduje powstanie chwilowego przeregulowania charakterystycznego dla układów regulacji wykorzystujących uchyb, a także predyktorów Smitha [11, 17]. Sama analiza matematyczna uzasadniająca strukturę oraz parametry bloku predykcyjnego będzie przedmiotem innej publikacji.

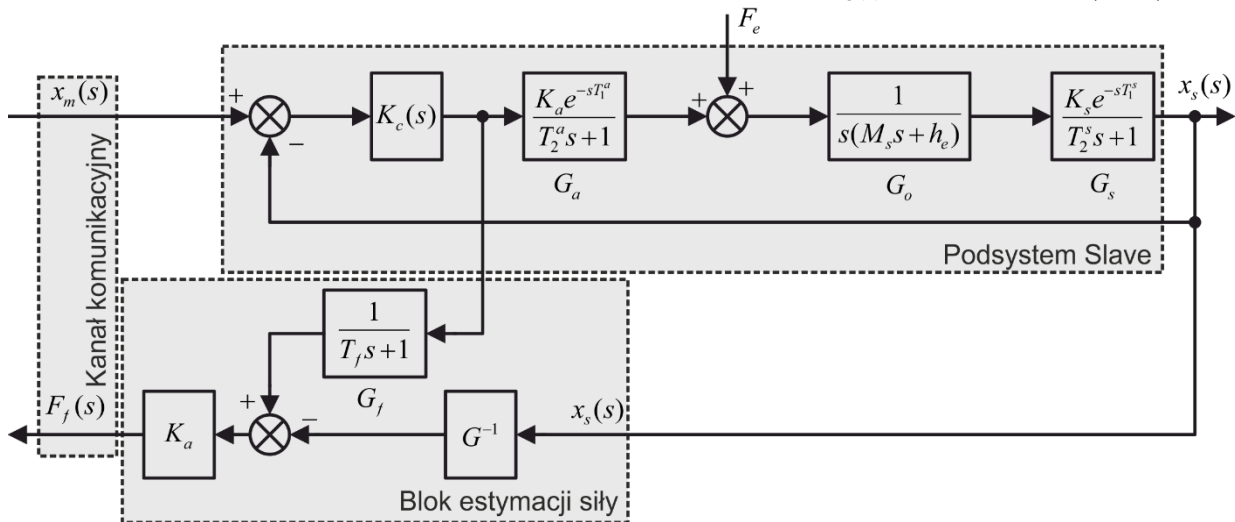
4. MODEL ODWROTNY Z PREDYKCJĄ SYGNAŁU WEJŚCIOWEGO I WYJŚCIOWEGO

Teoretyczna analiza przeprowadzona w poprzedniej publikacji [28] dowiodła, że do uzyskania idealnej wartości siły oddziaływania środowiska F_e w kanale siłowego sprzężenia zwrotnego niezbędny jest doskonały model obiektu rzeczywistego. W praktyce uzyskanie dokładne-

go modelu urządzenia jest niemożliwe, więc należy poszukiwać rozwiązań, które jak najbardziej zbliżą modele do ich rzeczywistych odpowiedników.

W publikacjach [28, 40] estymowanym sygnałem sterowania było ciśnienie pneumatyczne, które bezpośrednio oddziaływało na siłownik, wywołując ruch manipulatora. Niestety, czujniki ciśnienia przekazują informację do systemu ze znacznym opóźnieniem, które zależy od jego transmitancji oraz umiejscowienia w schemacie pneumatycznym/hydraulicznym [28].

W tym artykule estymowana jest wartość siły oddziaływania środowiska w siłowym sprzężeniu zwrotnym na podstawie sygnałów wewnątrz układu sterowania. Model odwrotny w tym przypadku estymuje wartość sygnału sterowania, która jest wyliczana przez układ sterowania na potrzeby ruchu swobodnego manipulatora. Następnym krokiem jest wyznaczenie różnicy sygnałów sterowania obiektu rzeczywistego oraz sygnału sterowania symulowanego przez model odwrotny G^{-1} na podstawie znanej trajektorii $x_s(s)$ podsystemu Slave (rys. 7).



Rys. 7. Schemat układu sterowania podsystemu Slave z blokiem estymacji siły.

Fragment systemu Master-Slave składa się z kanału komunikacyjnego, podsystemu Slave oraz bloku estymacji siły. W kanale komunikacyjnym przekazywane są informacje o pozycji podsystemu Master $x_m(s)$ do podsystemu Slave oraz przesyłana jest z podsystemu Slave do Master estymowana siła oddziaływania środowiska $F_f(s)$. Podsystem Slave składa się z transmitancji regulatora $K_c(s)$, napędu $G_a(s)$, obiektu $G_o(s)$, oraz czujnika $G_s(s)$. Transmitancja napędu charakteryzuje się trzema parametrami: wzmocnieniem K_a , stałą czasową opóźnienia transportowego T_1^a oraz stałą czasową obiektu inercyjnego pierwszego rzędu T_2^a . Obiekt charakteryzuje się masą M_s oraz współczynnikiem tłumienia wiskotycznego h_e , który w uproszczeniu przedstawia pewne opory ruchu działające na obiekt. Transmitancja czujnika położenia również charakteryzuje się trzema parametrami: wzmocnieniem K_s , stałą czasową opóźnienia transportowego T_1^s oraz stałą czasową obiektu inercyjnego

pierwszego rzędu T_2^s . Blok estymacji siły zawiera model odwrotny urządzenia G^{-1} , filtr dolnoprzepustowy G_f ze stałą czasową T_f oraz wzmocnienie różnicy sygnału K_a , identyczne jak dla transmitancji napędu $G_a(s)$.

Jeżeli wyznaczy się model odwrotny G^{-1} dla podsystemu z rys. 7 w postaci (2):

$$G^{-1} = e^{s(T_1^a + T_1^s)} \frac{(T_2^a s + 1)(T_2^s s + 1)(h_e + M_s s)}{K_a K_s (T_f s + 1)}, \quad (2)$$

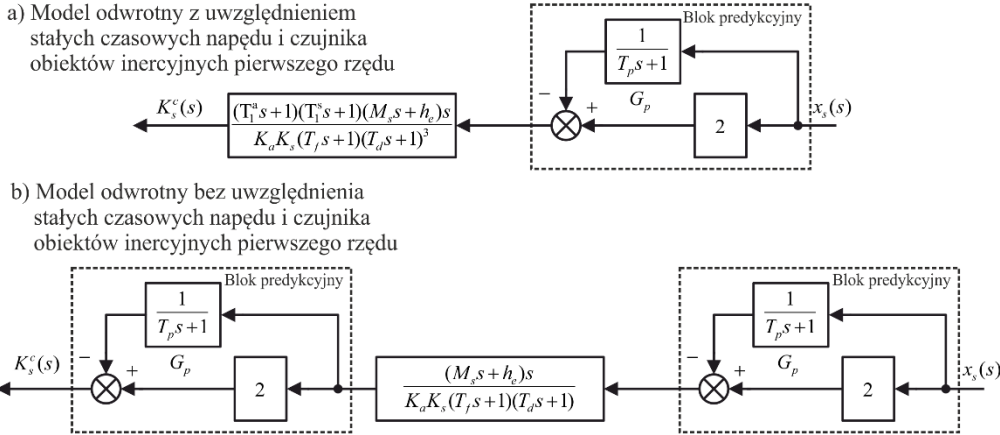
to uzyska się siłę w kanale siłowego sprzężenia zwrotnego $F_f(s)$ równą sile oddziaływania środowiska (3):

$$F_f(s) = F_e(s), \quad (3)$$

gdzie s jest operatorem Laplace'a. Jednak model odwrotny opisany równaniem (2) jest układem antycypacyjnym, który nie posiada żadnej interpretacji fizycznej oraz nie daje możliwości implementacji w układzie sterowania.

Aby zminimalizować skutki opóźnień transportowych w strukturę modelu odwrotnego G^{-1} , zaimplementowano blok predykcyjny. Przygotowano dwa rodzaje modeli

odwrotnych: 1. uwzględniający stałe czasowe obiektów inercyjnych pierwszego rzędu czujnika i napędu, 2. nieuwzględniający tych stałych czasowych (rys. 8).



Rys. 8. Model odwrotny "G" ^"-1" oparty na bloku predykcyjnym

Sygnałem wyjściowym modelu jest sygnał sterujący $K_c^s(s)$, który układ sterowania $K_c(s)$ powinien zadać na potrzeby osiągnięcia zadanej pozycji, gdy manipulator porusza się bez siłowego oddziaływania środowiska. W praktyce sygnał sterowania jest przybliżeniem tej wartości $K_c^s(s) \cong (x_m(s) - x_s(s)) K_c(s)$, który bez wykorzystania bloku predykcyjnego znacznie odbiega od rzeczywistego sygnału sterowania z regulatora $K_c(s)$ (rys. 3). Modele odwrotne zostały uzupełnione także o stałe czasowe T_d obiektów inercyjnych pierwszego rzędu, aby wyrównać rząd wielomianu w mianowniku względem licznika oraz odseparować szum, na który narażony jest blok predykcyjny.

Opracowany model odwrotny z rys. 8a lub 8b wymaga wyznaczenia tylko stałej czasowej T_p , ponieważ w teoretycznym przypadku zakłada się, że pozostałe parametry obiektu są znane. Aby wyznaczyć stałą czasową T_p bloku predykcyjnego, należy rozwiązać równanie na różnicę sygnałów sterujących w bloku estymacji siły, zakładając, że manipulator porusza się bez oddziaływania środowiska $F_f(s)=0$ – równanie (4):

$$(x_m(s) - x_s(s)) K_c(s) G_f(s) - G^{-1}(s, T_p) x_s(s) = 0, \quad (4)$$

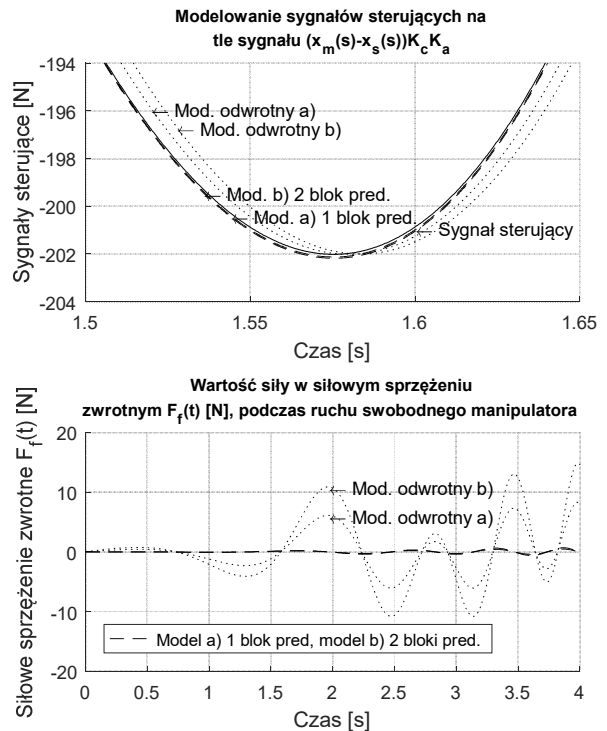
gdzie $G^{-1}(s, T_p)$ jest modelem odwrotnym urządzenia opartym na bloku predykcyjnym zaproponowanym jako rys. 8a lub 8b dla przykładu podsystemu Slave z rys. 7. Niestety, stała czasowa T_p , nawet dla tak prostego przykładu jak analizowany system przyjmuje rozwiązanie w funkcji operatora Laplace'a $T_p = T_p(s)$. W ramach prowadzonych badań i symulacji okazało się, że optymalną wartość stałej czasowej T_p otrzymuje się dla pulsacji dążącej do zera. Ze względu na ten fakt, należy policzyć granicę (5):

$$T_p = \lim_{s \rightarrow 0} T_p(s). \quad (5)$$

Aktualnie równanie (5) nie jest oparte na żadnym dowodzie matematycznym, a jedynie na badaniach i

analizie doboru stałej czasowej bloku predykcyjnego. Rozwiązując równania (4) i (5), uzyskuje się optymalną stałą czasową bloku predykcyjnego dla danej struktury systemu, danej ilości bloków predykcyjnych oraz przyjętego modelu odwrotnego urządzenia.

Dla podsystemu z rys. 7 oraz modeli z rys. 8 zostały przeprowadzone badania symulacyjne, których wyniki przedstawiono na rys. 9.



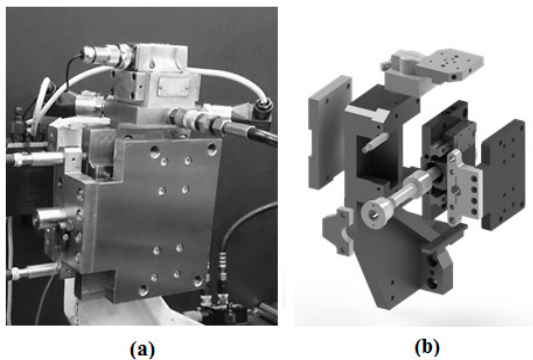
Rys. 9. Wyniki symulacji systemu z rys. 7 dla modeli z rys. 8

Badanie symulacyjne przeprowadzono dla danych: $K_c=100$; $K_a=1$; $K_s=1$; $T_1^a=0,002$; $T_2^a=0,002$; $M_s=10$; $h_e=1$; $T_1^s=0,002$; $T_2^s=0,002$; $F_e=0$; $T_d=0,0005$; $T_f=0,0005$ oraz sygnału $x_m(t)$ harmonicznego o zmiennej częstotliwości w zakresie od 0,1 do 10Hz. Wyniki symulacji potwierdzają, że model odwrotny zbudowany z

wykorzystaniem bloków predykcyjnych pozwala na znacznie dokładniejsze odzwierciedlenie sygnału sterowania nawet przy znacznych uproszczeniach, jak w modelu z rys. 8b. Potwierdza to charakterystyka zaznaczona linią przerywaną dla modeli odwrotnych z predykcją na tle linii ciągłej oznaczającej bazyowy sygnał sterujący. Zastosowanie dwóch bloków predykcyjnych i modelu uproszczonego b) pozwoliło na bardzo zbliżone odzwierciedlenie sygnału sterującego w stosunku do modelu złożonego a) z jednym blokiem predykcyjnym. Odpowiedzi modeli odwrotnych bez uwzględnienia bloków predykcyjnych charakteryzują się znacznie gorszym stopniem zgodności w stosunku do modeli odwrotnych z predykcją z obiektem modelowanym co znajduje swoje potwierdzenie na charakterystykach rys. 9.

5. EKSPERYMENT

Przedstawiona w pracy metoda została zweryfikowana na przygotowanym stanowisku serwoosi hydraulicznej wyposażonej w serwowawór MOOG 760s (rys. 10).

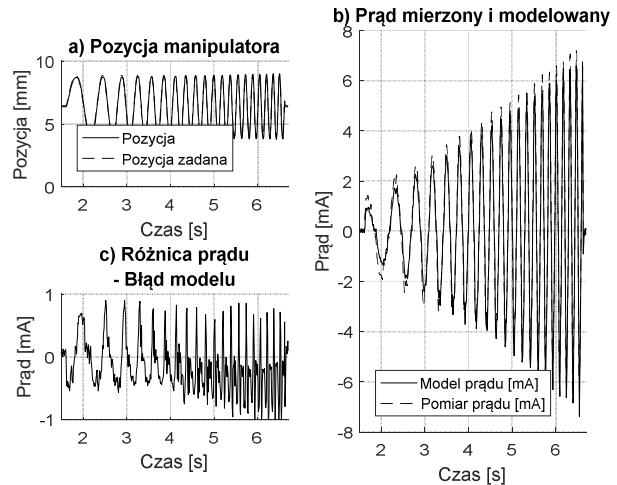


Rys. 10. Stanowisko badawcze (a) fotografia, (b) widok rozstrzelony CAD

Uproszczony liniowy manipulator został wyposażony w dwa niezależne czujniki pomiaru ciśnienia pozwalające na pomiar ciśnienia w dwóch osobnych komorach siłownika. Pomiar położenia korpusu manipulatora zrealizowano za pomocą dwóch analogowych czujników indukcyjnych, z których wyliczano wartość średnią położenia korpusu. Mierzonym sygnałem sterowania był prąd przepływający przez serwowawór. Model posiadał strukturę z rys. 8b, który uwzględnił dwa bloki predykcyjne, masę korpusu, współczynnik tłumienia (uproszczenie oporów ruchu), stałe czasowe filtracji T_d i T_f .

Filtracja poprzez bloki inercyjne pierwszego rzędu była konieczna ze względu na wartość amplitudy szumu, która wahała się w przedziale $\pm 5\%$ maksymalnych wartości sygnału mierzonego, zarówno dla prądu zaworu jak i położenia korpusu. Stałe czasowe T_p bloków predykcyjnych zostały oszacowane podczas iteracyjnej procedury dostrajania modelu, ponieważ nie było innej możliwości oszacowania tych parametrów.

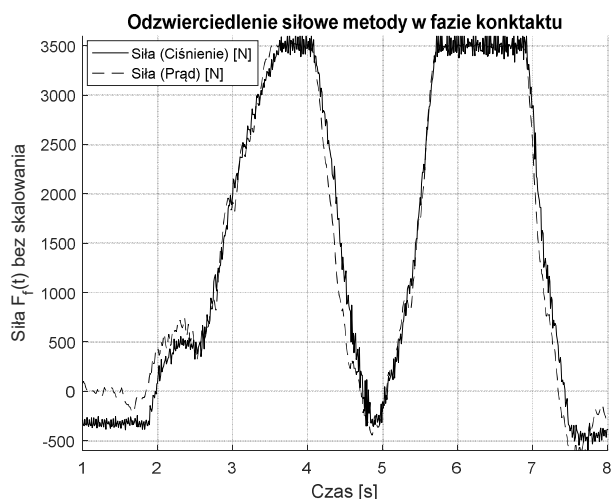
Opracowany model odwrotny estymował wartość prądu na podstawie znanej wartości pozycji korpusu manipulatora. Model ten został dostrójony metodą iteracyjną dla zmierzonych sygnałów wejścia i wyjścia na podstawie sygnału harmonicznego o zmiennej częstotliwości w zakresie od 0.1 do 5Hz (rys. 11).



Rys. 11. Estymacja sygnału sterowania: b) przez model odwrotny na podstawie pozycji; a) oraz różnica sygnału mierzonego i modelowanego

Model odwrotny o strukturze z rys. 8b nie uwzględniał nieliniowości w postaci tarcia pochodzących od zaciskających się uszczelki siłownika oraz niesymetrycznej pozycji suwaka zaworu. Oznacza to, że do operatora zostanie przekazana informacja w sprzężeniu siłowym zwrotnym o oddziaływaniu siłowym środowiska z uwzględnieniem tarcia wewnątrz siłownika. Sytuacja ta jest stosunkowo niekomfortowa, jednak po przeskalowaniu wartości w kanale siłowego sprzężenia zwrotnego dla operatora jest niezauważalna. Fakt ten uwarunkowany jest znacznymi dysproporcjami siły pomiędzy siłownikiem hydraulicznym a ludzkimi możliwościami.

Na podstawie opracowanego modelu przeprowadzono test, w którym operator miał za zadanie nacisnąć zdalnie podsystemem Slave na element środowiska charakteryzujący się bardzo wysoką sztywnością. Elementem tym był organicznik wysuwu siłownika (rys. 12).



Rys. 12. Siłowe sprzężenie zwrotne w fazie sztywnego kontaktu

Sygnal siłowego sprzężenia zwrotnego w fazie kontaktu został porównany z sygnałem siły wyliczonym na podstawie niezależnie mierzonych sygnałów z czujników ciśnienia. Przebiegi z rys. 12 potwierdzają, że model odwrotny uzupełniony o bloki predykcyjne bardzo dokładnie odzwierciedla sygnał siły wyliczony na podstawie sygnałów z czujników ciśnienia nawet przy znacznych uproszczeniach modelowych. Niestety, porównanie to możliwe jest jedynie podczas fazy sztywnego kontaktu, ponieważ czujniki ciśnienia przekazują informacje z większym opóźnieniem od bloku estymacji siły, co widoczne jest na przebiegu około drugiej sekundy. Przebiegi potwierdzają także, że model przekazuje wartość siły tarcia pochodzącego od uszczelek siłownika.

Prace realizowane były w ramach projektu PBS3/A6/28/2015 finansowanego przez NCBiR.

Literatura

1. Arcara, P., C. Melchiorri, and S. Stramigioli. Intrinsically passive control in bilateral teleoperation mimo systems. in "Control Conference (ECC), 2001 European". 2001. p. 1180-1185.
2. Atashzar, S.F., I.G. Polushin, and R.V. Patel. Projection-based force reflection algorithms for teleoperated rehabilitation therapy. in "2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems". 2013. p. 477-482.
3. Ben-Dov, D. and S.E. Salcudean. A force-controlled pneumatic actuator for use in teleoperation masters. in "Robotics and Automation, 1993. Proceedings., 1993 IEEE International Conference on". 1993. p. 938-943 vol.3.
4. Chang, M.-K., An adaptive self-organizing fuzzy sliding mode controller for a 2-DOF rehabilitation robot actuated by pneumatic muscle actuators. "Control Engineering Practice" 2010, 18(1): p. 13-22.
5. Ferrell, W.R., Delayed Force Feedback. "Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society" 1966, 8(5): p. 449-455.
6. Ferrell, W.R., Remote manipulation with transmission delay. "IEEE Transactions on Human Factors in Electronics" 1965, HFE-6(1): p. 24-32.
7. Ferrell, W.R. and T.B. Sheridan, Supervisory control of remote manipulation. "IEEE Spectrum" 1967, 4(10): p. 81-88.
8. Hastrudi-Zaad, K. and S.E. Salcudean. On the use of local force feedback for transparent teleoperation. in "Robotics and Automation, 1999. Proceedings. 1999 IEEE International Conference on". 1999. p. 1863-1869 vol.3.
9. Hulin, T., A. Albu-Schäffer, and G. Hirzinger, Passivity and Stability Boundaries for Haptic Systems With Time Delay. "IEEE Transactions on Control Systems Technology" 2014, 22(4): p. 1297-1309.

Jest to konsekwencja nieuwzględnienia tej cechy układu przy modelowaniu urządzenia.

Bardzo ważną cechą układu sterowania jest fakt, że system przekazuje informacje o sile oddziaływania środowiska do sprzężenia siłowego zwrotnego wcześniej, niż byłoby to możliwe do osiągnięcia na podstawie sygnałów pomiarowych z czujników ciśnienia. Jest to bardzo poważne usprawnienie systemów obustronnego działania z kanałem siłowego sprzężenia zwrotnego.

6. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono metodę budowy modeli odwrotnych oraz ich implementacji w układ sterowania zdalnie sterowanego systemu bezczujnikowego obustronnego działania z kanałem siłowego sprzężenia zwrotnego. Metoda została oparta na blokach predykcyjnych, które minimalizują skutki opóźnień transportowych występujących w obiektach rzeczywistych. Metoda także z powodzeniem pozwala na wprowadzenie znacznych uproszczeń modelowych przy zachowaniu znacznej dokładności estymacji sygnału sterującego. W pracy przedstawiono analizę częstotliwościową bloku predykcyjnego oraz metodę szacowania stałej czasowej bloków predykcyjnych. Zbudowany model zaimplementowano w strukturę stanowiska badawczego. Wyniki eksperymentu potwierdzają, że przedstawiona metoda w bardzo dokładny sposób estymuje wartość siły oddziaływania środowiska na współrzędnej konfiguracyjnej manipulatora.

10. Hyun Chul, C., et al. Sliding-mode-based impedance controller for bilateral teleoperation under varying time-delay. in "Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on". 2001. p. 1025-1030 vol.1.
11. Kaya, I., Obtaining controller parameters for a new PI-PD Smith predictor using autotuning. "Journal of Process Control" 2003, 13(5): p. 465-472.
12. Khadraoui, S., M. Rakotondrabe, and P. Lutz, Interval Modeling and Robust Control of Piezoelectric Microactuators. "Control Systems Technology, IEEE Transactions on" 2012, 20(2): p. 486-494.
13. Kim, W.S. Developments of new force reflecting control schemes and an application to a teleoperation training simulator. in "Robotics and Automation, 1992. Proceedings., 1992 IEEE International Conference on". 1992. p. 1412-1419 vol.2.
14. Kim, W.S., B. Hannaford, and A.K. Fejczy, Force-reflection and shared compliant control in operating telemanipulators with time delay. "Robotics and Automation, IEEE Transactions on" 1992, 8(2): p. 176-185.
15. Larson, R. and W. Keckler, Optimum adaptive control in an unknown environment. "IEEE Transactions on Automatic Control" 1968, 13(4): p. 438-439.
16. Lawrence, D.A., Stability and transparency in bilateral teleoperation. "Robotics and Automation, IEEE Transactions on" 1993, 9(5): p. 624-637.
17. Majhi, S. and D.P. Atherton, Obtaining controller parameters for a new Smith predictor using autotuning. "Automatica" 2000, 36(11): p. 1651-1658.
18. Miądlicki, K. and M. Pajor, Overview of user interfaces used in load lifting devices. "International Journal of Scientific & Engineering Research" 2015, 6(9): p. 1215-1220.
19. Miądlicki, K. and M. Pajor, Real-time gesture control of a CNC machine tool with the use Microsoft Kinect sensor. "International Journal of Scientific & Engineering Research" 2015, 6(9): p. 538-543.
20. Moreau, R., et al., Sliding-mode bilateral teleoperation control design for master-slave pneumatic servo systems. "Control Engineering Practice" 2012, 20(6): p. 584-597.
21. Nguyen, T., et al., Accurate Sliding-Mode Control of Pneumatic Systems Using Low-Cost Solenoid Valves. "Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on" 2007, 12(2): p. 216-219.
22. Niemeyer, G. and J.J.E. Slotine, Stable adaptive teleoperation. "Oceanic Engineering, IEEE Journal of" 1991, 16(1): p. 152-162.
23. Pajor, M., K. Miądlicki, and M. Saków, KINECT SENSOR IMPLEMENTATION IN FANUC ROBOT MANIPULATION. "Archives of mechanical technology and automation" 2014, 34(3): p. 35-44.
24. Polushin, I.G., A. Takhmar, and R.V. Patel, Projection-Based Force-Reflection Algorithms With Frequency Separation for Bilateral Teleoperation. "Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on" 2015, 20(1): p. 143-154.
25. Rakotondrabe, M. and I.A. Ivan, Development and Force/Position Control of a New Hybrid Thermo-Piezoelectric MicroGripper Dedicated to Micromanipulation Tasks. "Automation Science and Engineering, IEEE Transactions on" 2011, 8(4): p. 824-834.
26. Rakotondrabe, M., et al. Dynamic displacement self-sensing and robust control of cantilever piezoelectric actuators dedicated for microassembly. in "Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2010 IEEE/ASME International Conference on". 2010. p. 557-562.
27. Rakotondrabe, M., et al., Simultaneous Displacement/Force Self-Sensing in Piezoelectric Actuators and Applications to Robust Control. "Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on" 2015, 20(2): p. 519-531.
28. Saków, M., M. Pajor, and A. Parus, Estymacja siły oddziaływania środowiska na układ zdalnie sterowany ze sprzężeniem siłowym zwrotnym o kinematyce kończyny górnej. "MODELOWANIE INŻYNIERSKIE" 2016, 58: p. 113-122.
29. Saków, M. and A. Parus, Sensorless control scheme for teleoperation with force-feedback, based on a hydraulic servo-mechanism, theory and experiment. "Measurement Automation Monitoring" 2016, 62(12): p. 417-425.
30. Sheridan, T.B., Space teleoperation through time delay: review and prognosis. "Robotics and Automation, IEEE Transactions on" 1993, 9(5): p. 592-606.
31. Sheridan, T.B. and W.R. Ferrell, Human control of remote computer-manipulators, in Proceedings of the 1st international joint conference on Artificial intelligence. 1969, Morgan Kaufmann Publishers Inc.: Washington, DC. p. 483-494.
32. Stuart, K.D. and M. Majewski. Intelligent Opinion Mining and Sentiment Analysis Using Artificial Neural Networks. in "International Conference on Neural Information Processing". 2015. p. 103-110.
33. Stuart, K.D., M. Majewski, and A.B. Trelis. Intelligent semantic-based system for corpus analysis through hybrid probabilistic neural networks. in "International Symposium on Neural Networks". 2011. p. 83-92.

34. Tadano, K. and K. Kawashima. Development of 4-DOFs forceps with force sensing using pneumatic servo system. in "Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006.". 2006. p. 2250-2255.
35. Tavakoli, M., R.V. Patel, and M. Moallem. A force reflective master-slave system for minimally invasive surgery. in "Intelligent Robots and Systems, 2003. (IROS 2003). Proceedings. 2003 IEEE/RSJ International Conference on". 2003. p. 3077-3082 vol.3.
36. Tomovic, R. and G. Boni, An adaptive artificial hand. "IRE Transactions on Automatic Control" 1962, 7(3): p. 3-10.
37. Wei Tech, A., P.K. Khosla, and C.N. Riviere, Feedforward Controller With Inverse Rate-Dependent Model for Piezoelectric Actuators in Trajectory-Tracking Applications. "Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on" 2007, 12(2): p. 134-142.
38. Wen-Hong, Z. and S.E. Salcudean, Stability guaranteed teleoperation: an adaptive motion/force control approach. "Automatic Control, IEEE Transactions on" 2000, 45(11): p. 1951-1969.
39. Whitney, D., State space models of remote manipulation tasks. "IEEE Transactions on Automatic Control" 1969, 14(6): p. 617-623.
40. Yong, Z. and E.J. Barth. Impedance Control of a Pneumatic Actuator for Contact Tasks. in "Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation". 2005. p. 987-992.
41. Zhai, D.H. and Y. Xia, Adaptive Control for Teleoperation System With Varying Time Delays and Input Saturation Constraints. "IEEE Transactions on Industrial Electronics" 2016, 63(11): p. 6921-6929.
42. Zhai, D.H. and Y. Xia, Adaptive Control of Semi-Autonomous Teleoperation System With Asymmetric Time-Varying Delays and Input Uncertainties. "IEEE Transactions on Cybernetics" 2016, PP(99): p. 1-13.
43. Zhou, M. and P. Ben-Tzvi, RML Glove - An Exoskeleton Glove Mechanism With Haptics Feedback. "Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on" 2015, 20(2): p. 641-652.



Artykuł dostępny na podstawie licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0 Polska.
<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/pl>