

UKŁAD STEROWANIA SAMOWYZNACZAJĄCY SIŁY ODDZIAŁYWANIA ŚRODOWISKA NA MANIPULATOR WYKONAWCZY W CZASIE PRACY SYSTEMU TELEMANIPULACYJNEGO

MATEUSZ SAKÓW¹, MIROSLAW PAJOR¹, ARKADIUSZ PARUS¹

*¹Zakład Układów Mechatronicznych, Instytut Technologii Mechanicznej,
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
Al. Piastów 19, 70-310 Szczecin*

mateusz.sakow@zut.edu.pl, miroslaw.pajor@zut.edu.pl, arkadiusz.parus@zut.edu.pl,

STRESZCZENIE

W niniejszej pracy przedstawiono układ zdalnie sterowany z siłowym sprzężeniem zwrotnym. Układ ten oparty jest na wykorzystaniu modelu odwrotnego systemu, który estymuje wartość siły oddziaływania środowiska na konstrukcję manipulatora wykonawczego. W przeciwieństwie do popularnych sensorowych metod, gdzie pomiar siłowego oddziaływania odbywa się w miejscu umieszczenia czujnika, przedstawiony algorytm sterowania nie wykorzystuje żadnych dodatkowych czujników pomiarowych, poza niezbędnym w układzie sterowania – pomiarem położenia. W ramach prowadzonych badań dokonano analizy wybranego układu sterowania. W wyniku badań zweryfikowano jego funkcjonalność i poprawność działania w warunkach laboratoryjnych. Badania zostały przeprowadzone na hydraulicznym, liniowym manipulatorze zdalnie sterowanym. W ramach prac dokonano porównania dokładności odwzorowania siły w kanale komunikacyjnym. W podsumowaniu zaprezentowano i omówiono wyniki badań oraz przedstawiono je na tle podobnych rozwiązań prezentowanych w literaturze.

1. Wprowadzenie

Działania naukowców mające na celu zapewnienie bezpiecznego manipulowania przedmiotami, doprowadziły do opracowania tzw. systemów Master-Slave z siłowym sprzężeniem zwrotnym. Systemy zdalnie sterowane z siłowym sprzężeniem zwrotnym odgrywają niezwykle ważną rolę podczas manipulacji przedmiotami na znacznych dystansach. Systemy te w przyszłości z pewnością znajdą również zastosowanie w środowiskach, które w sposób bezpośredni zagrażałyby operatorom urządzeń, bądź

osobom przebywającym w tym otoczeniu. Do niebezpiecznych miejsc, w których można byłoby umieścić podsystem wykonawczy Slave systemu zdalnie sterowanego można z pewnością zaliczyć głębiny oceanów, reaktory atomowe, przestrzeń kosmiczną oraz wszystkie inne miejsca, w których ich charakter bądź uprzednia działalność człowieka uniemożliwiają bezpieczną pracę [1-6].

Od 1966 roku trwają prace nad algorytmami i schematami sterowania, które mają sprostać realizacji trajektorii przez system wykonawczy zwany - Slave. Również te same algorytmy i schematy sterowania mają za zadanie poprawnie, co do wartości mierzyć i realizować wartości siłowego oddziaływania środowiska, w siłowym sprzężeniu zwrotnym. Cecha ta wiąże się z tzw. jakością odczucia siły w siłowym sprzężeniu zwrotnym przez operatora kontrolującego system lokalny zwany – Master [2, 7-13].

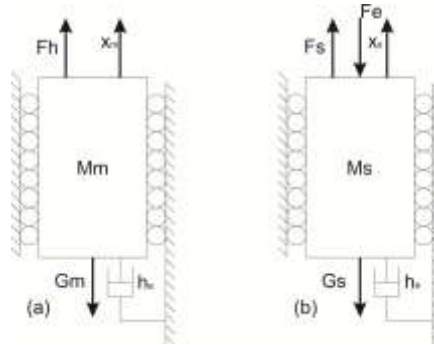
Głównym założeniem w prezentowanym artykule jest opracowanie metody, która pozwoli na estymację siły bądź momentu oddziaływania środowiska na konkretnej współrzędnej konfiguracyjnej manipulatora. Ta metoda jednak nie wykorzystuje elementów podatnych pośredniczących pomiędzy otoczeniem, a efektem (konstrukcją) manipulatora. Informacją na podstawie, której uzyskiwana jest wartość siły oddziaływania środowiska są sygnały w układzie sterowania, dotyczące konkretnej współrzędnej konfiguracyjnej manipulatora. Z sygnałów sterujących, tj. ciśnienie medium roboczego, napięcia i w przypadku tej pracy natężenie prądu przepływającego przez serwozawór hydrauliczny, możliwe jest odczytanie za pośrednictwem modelu odwrotnego wartości siły oddziaływania środowiska na konkretnej współrzędnej konfiguracyjnej. Ta konkretna cecha wyróżnia prezentowany system z pośród pozostałych przedstawianych w literaturze [2, 5, 13-22].

Przedstawianą metodę estymacji siły oddziaływania środowiska, można śmiało zaliczyć do grupy bez sensorowych i samowyznaczających urządzeń z siłowym sprzężeniem zwrotnym. Należy jednak być świadomym, że do tej pory w tej grupie znajdowały się przeważnie systemy, których napędami były krysztaly piezoelektryczne. Te krysztaly jednocześnie pełniły rolę korpusu, napędu i sensora. Stanowiły również elementy manipulatorów przeznaczonych do pracy z niewielkimi obiektami. W tej pracy, cały manipulator traktowany jest, jako zbiór ciał doskonale sztywnych bez uwzględnienia elementów podatnych w konstrukcji manipulatora [14, 15, 23-25].

XXI wiek stał się okresem, w którym rozpoczęto wykorzystywać zaawansowane systemy sterowania oparte min. na regulatorach adaptacyjnych, z zastosowaniem logiki rozmytej oraz sztucznych sieci neuronowych. Wszystkie algorytmy są implementowane w struktury obustronnych układów sterowania. Obecnie trwają prace nad wdrożeniem zaawansowanych systemów sterowania w postaci logiki rozmytej, wykorzystującej regulator z przesuwym horyzontem, których głównym zadaniem jest kontrola pozycji. Regulatory z przesuwym horyzontem są implementowane w strukturę systemów zdalnie sterowanych min. w celu poprawy, jakości odwzorowania trajektorii przy zmiennych opóźnieniach w kanale komunikacyjnym. Wiele algorytmów sterowania skupionych jest na utrzymaniu stabilności. Najnowszym rozwiązaniem pozwalającym na zachowanie stabilnej pracy systemu obustronnego działania, jest metoda separacji częstotliwości [8, 13, 26].

2. Układ sterowania samowyznaczający siły oddziaływania środowiska

Systemy zdalnie sterowane z siłowym sprzężeniem zwrotnym wykorzystują dwa podsystemy - Master oraz Slave [1-6]. Mechaniczna interpretacja podsystemu Master (a) jak i podsystemu Slave (b) została przedstawiona na rys. 1.



Rys. 1. Graficzna prezentacja modeli: podsystem a) Master, b) Slave

Podsystem Master pełni rolę tzw. „skanera”, którego celem jest przesłanie informacji o własnej pozycji x_m do układu sterowania podsystemu Slave. Pozycja obiektu Master zależy od dwóch sił działających na ten podsystem. Siła grawitacji $G_m = M_m g$, gdzie g jest wartością przyspieszenia ziemskiego, natomiast M_m opisuje masę obiektu Master - skanera. Siła oddziaływania człowieka F_h pochodzi od operatora współpracującego z urządzeniem po stronie podsystemu Master. Cały obiekt Master i Slave porusza się w ośrodku, który dla uproszczenia został zamodelowany, jako stały w czasie parametr tłumienia wiskotycznego h_e . Podsystem wykonawczy Slave jest strukturalnie i pod względem parametrów identyczny z podsystemem Master. System ten również charakteryzują parametry masy M_s , grawitacji G_s oraz tłumienia h_e . Za pozycję podsystemu Slave x_s , natomiast odpowiadają trzy siły - grawitacji G_s , siła pochodzą z układu napędowego F_s (układu regulacji położeniem obiektu Slave) oraz siła oddziaływania środowiska F_e .

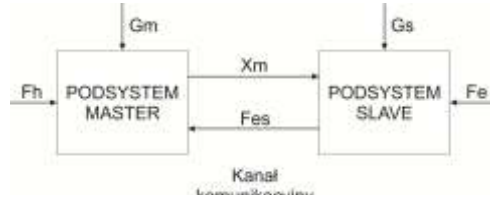
Prezentowany system składa się z podsystemów, których dynamikę charakteryzuje masa oraz element dyssypacyjny. Tego rodzaju obiekty zwane są obiektami masowo-dyssypacyjnymi. Transmitancja tego rodzaju układów mechanicznych może zostać opisana równaniem (1):

$$B_i = \frac{1}{(M_i s + h_e) s} \quad (1)$$

gdzie B_i jest transmitancją odpowiedniego podsystemu, natomiast indeks $i = m, s$ odpowiada: m dla podsystemu Master oraz s dla podsystemu wykonawczego - Slave, s jest operatorem Laplace'a. M_s - masa manipulatora Slave, M_m - masa manipulatora Master.

Podsystem Slave oprócz układu regulacji sterującego pozycją uwzględnia również oddziaływania środowiska w postaci siły F_e . Zgodnie z założeniami systemu zdalnie sterowanego z siłowym sprzężeniem zwrotnym, w pracach badawczych [1-6], powinien on uwzględniać pomiar siły oddziaływania środowiska pomiędzy efektem

a otoczeniu, w którym znajduje się manipulator wykonawczy. W opisywanym wypadku taka sytuacja nie występuje, ponieważ wartość oddziaływania środowiska jest estymowana na podstawie sygnałów z układu sterowania na danej współrzędnej konfiguracyjnej manipulatora. System bazowy charakteryzowałby się strukturą przedstawioną na rys. 2.

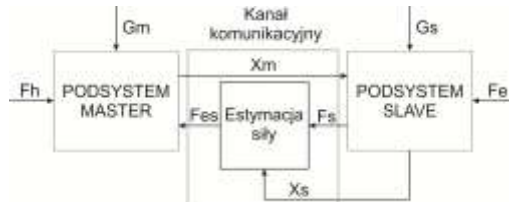


Rys. 2. Struktura bazowego systemu Master - Slave uwzględniającego pomiar siły oddziaływania środowiska

W przypadku z pomiarem siły (rys. 2) w sprzężeniu siłowym zwrotnym pojawia się wartość sygnału pochodząca z układu pomiarowego tej siły F_{es} . Biorąc pod uwagę fakt, że pomiar oddziaływania siłowego środowiska na manipulator Slave występuje dokładnie pomiędzy otoczeniem a konstrukcją manipulatora, należy zauważyć, że taki system będzie zwracał niekorzystne informacje w sprzężeniu siłowym zwrotnym pochodzące wyłącznie od samej masy czujnika. Jest to sytuacja stosunkowo niekomfortowa, ale łatwa w implementacji. Ten rodzaj realizacji siłowego sprzężenia zwrotnego nie wymaga skomplikowanej ingerencji w układ sterowania.

Jedną z poważnych wad metod wykorzystujących pomiar siły pomiędzy efektem manipulatora a otoczeniem jest to, że w przypadku stosowania par kinematycznych obrotowych należałoby zastosować ogromną liczbę czujników na ramieniu manipulatora. Układ sterowania musiałby mierzyć wartość siły z każdego z tych czujników i dopiero na podstawie znajomości promienia, na jakim dany czujnik się znajduje, przekazywać informację do sprzężenia siłowego zwrotnego. Dopiero takie postępowanie w projektowaniu urządzenia dałoby adekwatną informację na temat oddziaływania środowiska na danej współrzędnej konfiguracyjnej manipulatora. W przypadku ruchu prostoliniowego taka sytuacja nie występuje, ponieważ do zmierzenia oddziaływania środowiska na takiej współrzędnej konfiguracyjnej niezbędny jest jedynie pojedynczy pomiar siły. Inną poważną wadą rozwiązań wykorzystujących czujnik jest sama podatność uwzględniona w konstrukcji manipulatora. Elementy podatny bowiem często prowadzi do destabilizacji pracy systemu, nad utrzymaniem której skupionych jest wiele algorytmów sterowania [2, 4-9, 12, 13, 18, 26-33]. W prezentowanej metodzie nie wykorzystuje się żadnych elementów o podwyższonej podatności w stosunku do konstrukcji manipulatora, dlatego ten problem został już wyeliminowany przez samą konstrukcję.

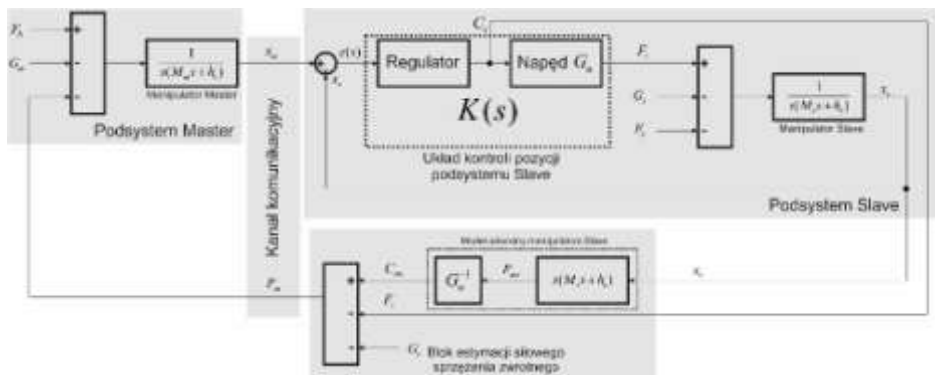
W celu uniknięcia konieczności stosowania dużej liczby czujników, w niniejszej pracy została zaprezentowana znaczna modyfikacja struktury systemu zdalnie sterowanego przedstawionego na rys. 2. Zmiany dotyczą radykalnej restrukturyzacji kanału komunikacyjnego oraz wykorzystania dwukanałowej/trójkanałowej wersji sterowania systemu zdalnie sterowanego z siłowym sprzężeniem zwrotnym. Zmodyfikowana budowa systemu została przedstawiona na rys. 3.



Rys. 3. Struktura zmodyfikowanego systemu Master - Slave uwzględniającego pomiar siły oddziaływania środowiska

Układ bazowy z rys. 2. przesyła pomiędzy podsystemami Master oraz Slave dwie informacje. Pierwszą z nich jest trajektoria zadana do realizacji przez układ sterowania podsystemu Slave x_m . Podsystem Slave w zamian zwraca informację o sile, jaką oddziałuje na środowisko F_{es} . Siła ta pochodzi bezpośrednio z czujnika pomiarowego, który znajduje się pomiędzy manipulatorem a obiektami otoczenia.

System zdalnie sterowany obustronnego działania po wprowadzeniu modyfikacji z rys. 3. również przesyła informację o zadanej pozycji do podsystemu Slave x_m , na podstawie trajektorii zrealizowanej przez podsystem Master. Różnica jest radykalna przy zwracaniu siły oddziaływania środowiska F_{es} w przeciwnym kierunku - Slave do Master. System bazowy mierzył siłę oddziaływania środowiska, natomiast zmodyfikowany estymuje wartość siły na podstawie sygnałów sterujących wygenerowanych przez układ sterowania oraz aktualnej pozycji - wartości współrzędnej konfiguracyjnej manipulatora Slave. Prosty i idealny system o jednym stopniu swobody, z członem estymującym wartość siły oddziaływania środowiska w siłowym sprzężeniu zwrotnym przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Graficzna prezentacja schematu blokowego systemu Master-Slave z estymacją siły oddziaływania środowiska – przykład 1 stopień swobody

Jak ukazano na rys. 4., model systemu zdalnie sterowanego obustronnego działania z siłowym sprzężeniem zwrotnym posiada jedno wejście w postaci siły generowanej na potrzeby ruchu podsystemu Master przez człowieka F_h . Układ ma także jedno wyjście w postaci pozycji podsystemu Slave x_s . Wyszczególnione są również trzy bloki tego systemu: podsystemy Master, Slave oraz blok służący do estymacji siły w siłowym sprzężeniu zwrotnym. W systemie został wyszczególniony nowy sygnał C_{sm} , który opisuje wartość sygnału sterującego potrzebnego do zrealizowania trajektorii x_s , przez manipulator Slave podczas pracy w tzw. ruchu swobodnym. Ruch swobodny

występuje wówczas, kiedy manipulator nie napotka na zewnętrzne oddziaływanie środowiska. Jednak model systemu uwzględnia oddziaływanie ośrodka roboczego w postaci tłumienia h_e . Jest to jeden z warunków niezbędnych do przeprowadzenia dowodu potwierdzającego poprawność działania metody. Siła F_{es} , która występuje w kanale komunikacyjnym, jest różnicą wartości sygnału sterującego mierzonego $C_s G_n$ (gdzie G_n jest transmitancją napędu), wygenerowany na potrzeby ruchu przez układ sterowania oraz sygnału sterowania wyliczonego przez model na podstawie znajomości aktualnej pozycji podsystemu Slave – $C_{sm} G_n$. Przy wcześniej wspomnianej analizie systemu pod względem poprawności działania prezentowanej metody oraz przy analizie składowych transmitancji należy spodziewać się, że przy braku uwzględnienia oddziaływania środowiska w strukturze podsystemu Slave transmitancja tego systemu oraz model estymacji siły powinna zredukować się do wartości zerowej, natomiast w przypadku, gdy będzie występowało oddziaływanie środowiska, siła w sprzężeniu siłowym zwrotnym powinna odpowiadać sile oddziaływania środowiska $F_{es} = F_e$.

Przedstawiona w pracy metoda znajduje swoje potwierdzenie podczas analizy składowych transmitancji systemu. Pierwszą istotną transmitancją przy analizie działania prezentowanego układu jest transmitancja obiektu, która symuluje oddziaływanie napędu na podsystem Slave na podstawie pozycji zadanej x_m . Transmitancja ta została opisana wzorem (2):

$$\frac{C_{sm}(s)G_n}{x_m(s)} = \frac{K(s)(M_s s + h_e)s}{(M_s s + h_e)s + K(s)} \quad (2)$$

Transmitancja z równania (2) będzie redukowałą transmitancję, którą wyznacza stosunek sygnałów $C_s(s)G_n / x_m(s)$ – równanie (3):

$$\frac{C_s(s)G_n}{x_m(s)} = \frac{K(s)(M_s s + h_e)s}{(M_s s + h_e)s + K(s)} \quad (3)$$

Jak widać, transmitancje (2) i (3) są identyczne, co oznacza, że przy braku oddziaływania środowiska sprzężenie siłowe zwrotne będzie zawsze zwracało wartość 0 do operatora takiego systemu. Oczywiście dowód dotyczy modelu matematycznego obiektu, który jest znany. W przypadku, w którym model będzie nieznacznie rozbieżny z obiektem rzeczywistym, mogą pojawić się pewne przekłamania wartości siły w siłowym sprzężeniu zwrotnym. Te przekłamania będą zależne od dokładności wyznaczenia modelu obiektu. Druga część analizy obejmuje sprawdzenie jak powinien zachować się idealny system w razie wystąpienia sił zewnętrznych, takich jak grawitacja oraz oddziaływanie środowiska.

Pierwszym etapem jest modyfikacja równania (2) oraz (3), tak, aby uwzględniały oddziaływanie grawitacji oraz środowiska, do postaci (4), i (5):

$$\frac{C_{sm}(s)G_n - G_s}{x_m(s)} = \frac{K(s)(M_s s + h_e)s}{(M_s s + h_e)s + K(s)} \quad (4)$$

$$\frac{C_s(s)G_n - G_s - F_e}{x_m(s)} = \frac{K(s)(M_s s + h_e)s}{(M_s s + h_e)s + K(s)} \quad (5)$$

Jednocześnie równania te stają się zgodne ze schematem z rys. 4. Po odjęciu równań (4) i (5) otrzymuje się równanie (6):

$$C_s(s)G_n - C_{sm}(s)G_n = F_e \quad (6)$$

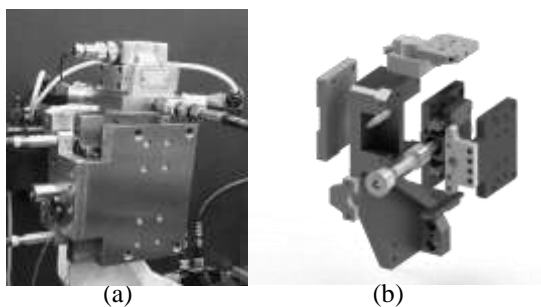
gdzie różnica $(C_s(s) - C_{sm(s)})G_n(s)$ zgodnie ze schematem z rys. 6, odpowiada wartości siłowego sprzężenia zwrotnego w systemie (7):

$$F_{es} = F_e. \quad (7)$$

Jak widać, system w przypadku posiadania idealnego modelu będzie zawsze przekazywał wartość oddziaływania środowiska dokładnie taką, z jaką to środowisko będzie na ten układ zdalnie sterowany oddziaływać. Należy jednak pamiętać, że uzyskanie modelu dokładnie odpowiadającego rzeczywistemu obiektowi jest w praktyce niemożliwe, więc wartość oddziaływania środowiska w sprzężeniu siłowym zwrotnym prezentowanego systemu będzie silnie zależała od dokładności wyznaczenia tego modelu.

3. Eksperyment

Objektem poddanym badaniom była hydrauliczna serwoosć sterowana serwowaworem MOOG serii 760. Podsystem Slave został przedstawiony na rys. 5a. Na rys. 5b przedstawiono rozstrzelony widok w celu przedstawienia struktury mechanicznej omawianego manipulatora.



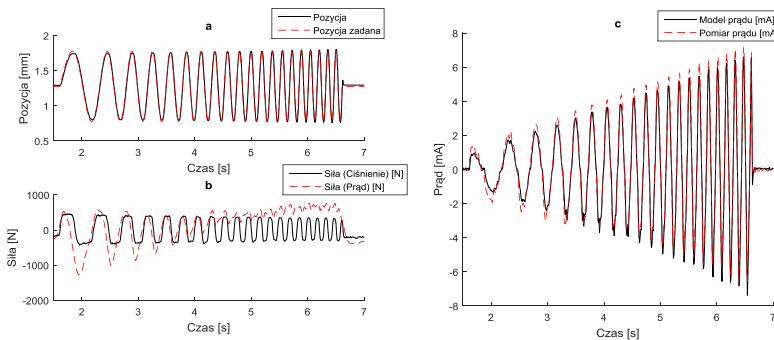
Rys. 5. Hydrauliczna serwoosć podsystemu Slave (a), widok rozstrzelony (b)

Hydrauliczny serwomechanizm Slave był sterowany przez serwowawór serii 760 firmy MOOG. Ten niezwykle ważny i kosztowny komponent pozwolił na osiągnięcie stosunkowo dobrego śledzenia trajektorii zadanej przez podsystem Slave. Ta istotna cecha, brana jest pod uwagę, gdy porównuje się systemy zdalnie sterowane ze sprzężeniem siłowym zwrotnym. Zastosowanie tego rodzaju zaworu pozwoliło na realizację, nie tylko pod względem śledzenia pozycji, ale również odzwierciedlanie siły z układu sterowania na stosunkowo sztywne elementy otoczenia. Układ sterowania wyznaczał siły na podstawie uchybu pozycji zadanej oraz trajektorii zrealizowanej przez podsystem Slave.

Podsystem Slave został wyposażony w dwa niezależne pomiary ciśnienia umieszczone przy przyłączach komór siłownika. Ze względu na silne zakłócenia w sygnale nie było możliwości analizowania układu Master-Slave działającego z wystarczającą precyzją. Z tego względu dodatkowo zamontowano dwa czujniki położenia (w układzie sterowania wykorzystano ich średnią wartość).

Na tak opracowanym stanowisku badawczym została przeprowadzona seria testów. Pierwszy test pokazuje jak system jest w stanie dobrze śledzić pozycję zadaną, podczas ruchu swobodnego. Pozycja zadana to sygnał okresowy o zmiennej częstotliwości w zakresie od 1 do 5 Hz. Na rys. 6a przedstawione zostały przebiegi pozycji zadanej oraz

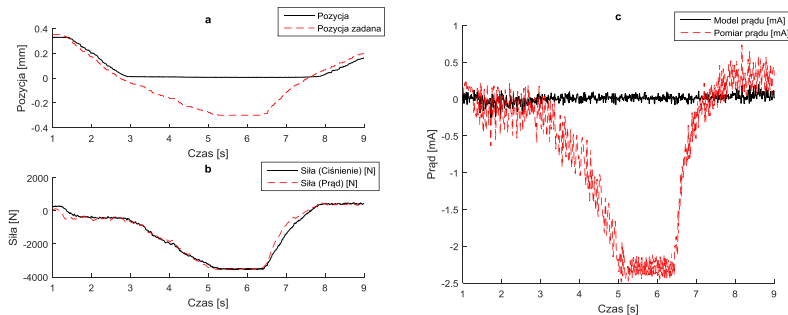
zrealizowanej przez podsystem Slave, rys. 6b przedstawia wyznaczone siły w układzie, rys. 6c przedstawia pomiar prądu oraz jego odwzorowanie modelowe. Wszystkie przebiegi z rys. 6 dotyczą ruchu swobodnego.



Rys. 6. Wyniki pomiarów – test 1

Pierwszy test dowiódł, że opracowany podsystem Slave jest w stanie śledzić pozycję z dużą dokładnością, ale również odzwierciedla sygnał sterujący w postaci prądu także na stosunkowo dobrym poziomie. Rys. 6c dowodzi, że systemy zdalnie sterowane z siłowym sprzężeniem zwrotnym nie muszą wykorzystywać podatnych czujników pomiarowych, które często zaburzają pracę systemu. Wartość tego oddziaływania może być śmiało estymowana na podstawie samych sygnałów sterujących manipulatorów, które traktowane są, jako ciała doskonale sztywne. Jednak przebiegi sił dowodzą tego, że algorytm nie radzi sobie z poprawnym odzwierciedleniem siły podczas szybkich ruchów, natomiast prawidłowo wyznacza tą wartość dla ruchów wolnych.

Drugi test, miał za zadanie określić zdolność układu do estymacji oddziaływania siłowego środowiska podczas kontaktu ze sztywnym nieprzesuwnym elementem. Wyniki zostały zaprezentowane na rys. 7.



Rys. 7. Wyniki pomiarów – test 2

Z przedstawionych wykresów wynika, że system dla naturalnych ruchów wygenerowanych przez operatora, zarówno w swobodnym ruchu, jak i w sztywnym kontakcie wyznacza wartości oddziaływania środowiska stosunkowo dokładnie. Wartość tarcia jednak nadal jest widoczna na wykresie (b), który porównuje siłę wyliczoną na podstawie różnicy ciśnienia w komorach do tej siły wyliczonej na podstawie różnicy modelowanego i mierzonego prądu. Opierając się na przebiegu

ciśnienia błąd wartości wyznaczenia w siłowym sprzężeniu zwrotnym nie przekroczył tym razem 10%. Wartość ta jest stosunkowo dobrym wynikiem przy uwzględnieniu niedoskonałości mechanicznych stanowiska badawczego.

4. Podsumowanie

W pracy poruszono problematykę wyznaczania oddziaływania środowiska w siłowym sprzężeniu zwrotnym opartej na zmodyfikowanej metodzie impedancyjnej [20, 29, 34], która wyznaczała wartość oddziaływania środowiska wewnątrz układu sterowania. Metoda ta nie korzystała z żadnych dodatkowych czujników, poza czujnikiem pomiaru położenia korpusu. Stanowisko badawcze oparte na prezentowanym algorytmie można uznać za sukces pod względem pracy z operatorem i śledzenia jego stonowanych pod względem prędkości ruchów. System dla stosunkowo wolnych ruchów charakteryzuje się niewielkim błędem wyznaczenia wartości oddziaływania siłowego środowiska w siłowym sprzężeniu zwrotnym. Zmodyfikowana metoda jednak posiada kilka wad. Przede wszystkim jest to zjawisko dryftu pozycji w fazie kontaktu ze sztywnym elementem otoczenia. Wartość ta jest stosunkowo niewielka, ale występuje w czasie pracy systemu. Na przebiegach widoczny jest również uchyb statyczny, jednak jego wartości są stosunkowo niewielkie. Za większość wad układu odpowiadają tarcie oraz niesymetryczność ustawienia suwaka zaworu. Do dalszych badań planowane jest zminimalizowanie wpływu tych czynników na pracę całego systemu.

Bibliografia

- [1] C. Melchiorri, *Telemanipulation: System aspects and control issues*. Singapore: World Scientific, 1996.
- [2] B. Hannaford, "Stability and performance tradeoffs in bi-lateral telemanipulation," in *Robotics and Automation*, 1989. Proceedings., 1989 IEEE International Conference on, 1989, pp. 1764-1767 vol.3.
- [3] C. Melchiorri, "Robotic telemanipulation systems: An overview on control aspects," in *Proceedings of the 7th IFAC Symposium on Robot Control*, 2003, pp. 707-716.
- [4] P. Arcara, C. Melchiorri, and S. Stramigioli, "Intrinsically passive control in bilateral teleoperation mimo systems," in *Control Conference (ECC), 2001 European*, 2001, pp. 1180-1185.
- [5] W. S. Kim, B. Hannaford, and A. K. Fejczy, "Force-reflection and shared compliant control in operating telemanipulators with time delay," *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, vol. 8, pp. 176-185, 1992.
- [6] P. Arcara and C. Melchiorri, "Control schemes for teleoperation with time delay: A comparative study," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 38, pp. 49-64, 1/31/ 2002.
- [7] G. Niemeyer and J. J. E. Slotine, "Stable adaptive teleoperation," *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, vol. 16, pp. 152-162, 1991.
- [8] Z. Wen-Hong and S. E. Salcudean, "Stability guaranteed teleoperation: an adaptive motion/force control approach," *Automatic Control, IEEE Transactions on*, vol. 45, pp. 1951-1969, 2000.
- [9] D. A. Lawrence, "Stability and transparency in bilateral teleoperation," *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, vol. 9, pp. 624-637, 1993.
- [10] C. Hyun Chul, P. Jong Hyeon, K. Kyunghwan, and P. Jong-Oh, "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, pp. 1025-1030 vol.1.
- [11] P. Jong Hyeon and C. Hyun Chul, "Sliding-mode controller for bilateral teleoperation with varying time delay," in *Advanced Intelligent Mechatronics, 1999. Proceedings. 1999 IEEE/ASME International Conference on*, 1999, pp. 311-316.
- [12] R. Moreau, M. T. Pham, M. Tavakoli, M. Q. Le, and T. Redarce, "Sliding-mode bilateral teleoperation control design for master-slave pneumatic servo systems," *Control Engineering Practice*, vol. 20, pp. 584-597, 6// 2012.

- [13] I. G. Polushin, A. Takhmar, and R. V. Patel, "Projection-Based Force-Reflection Algorithms With Frequency Separation for Bilateral Teleoperation," *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, vol. 20, pp. 143-154, 2015.
- [14] M. Rakotondrabe, I. A. Ivan, S. Khadraoui, P. Lutz, and N. Chaillet, "Simultaneous Displacement/Force Self-Sensing in Piezoelectric Actuators and Applications to Robust Control," *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, vol. 20, pp. 519-531, 2015.
- [15] C. Yuguo, "Self-Sensing Compounding Control of Piezoceramic Micro-Motion Worktable Based on Integrator," in *Intelligent Control and Automation, 2006. WCICA 2006. The Sixth World Congress on*, 2006, pp. 5209-5213.
- [16] M. Zhou and P. Ben-Tzvi, "RML Glove - An Exoskeleton Glove Mechanism With Haptics Feedback," *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, vol. 20, pp. 641-652, 2015.
- [17] T. Noritsugu, "Pulse-width modulated feedback force control of a pneumatically powered robot hand," in *International Symposium of Fluid Control and Measurement*, Tokyo, 1985, pp. 47-52.
- [18] K. Hastrudi-Zaad 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, pp. 1863-1869 vol.3.
- [19] M. Taghizadeh, A. Ghaffari, and F. Najafi, "Improving dynamic performances of PWM-driven servo-pneumatic systems via a novel pneumatic circuit," *ISA Trans*, vol. 48, pp. 512-8, Oct 2009.
- [20] N. Hogan, "Impedance Control: An Approach to Manipulation: Part II—Implementation," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 107, pp. 8-16, 1985.
- [21] B. Guerriero and W. Book, "Haptic Feedback Applied to Pneumatic Walking," in *ASME 2008 Dynamic Systems and Control Conference*, 2008, pp. 591-597.
- [22] D. Ben-Dov 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, pp. 938-943 vol.3.
- [23] Y. Ishikiriyama and T. Morita, "Improvement of self-sensing piezoelectric actuator control using permittivity change detection," *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, vol. 4, pp. 143-149, 2010.
- [24] M. Rakotondrabe, I. A. Ivan, S. Khadraoui, C. Cleve, P. Lutz, and N. Chaillet, "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, pp. 557-562.
- [25] T. Takigami, K. Oshima, Y. Hayakawa, and M. Ito, "Application of self-sensing actuator to control of a soft-handling gripper," in *Control Applications, 1998. Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on*, 1998, pp. 902-906 vol.2.
- [26] S. F. Atashzar, 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, pp. 477-482.
- [27] S. Khadraoui, M. Rakotondrabe, and P. Lutz, "Interval Modeling and Robust Control of Piezoelectric Microactuators," *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, vol. 20, pp. 486-494, 2012.
- [28] S. Hodgson, M. Q. Le, M. Tavakoli, and M. T. Pham, "Improved tracking and switching performance of an electro-pneumatic positioning system," *Mechatronics*, vol. 22, pp. 1-12, 2// 2012.
- [29] J. Seul, T. C. Hsia, and R. G. Bonitz, "Force tracking impedance control of robot manipulators under unknown environment," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 12, pp. 474-483, 2004.
- [30] W. R. Ferrell, "Delayed Force Feedback," *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, vol. 8, pp. 449-455, October 1, 1966 1966.
- [31] R. Anderson and M. W. Spong, "Bilateral control of teleoperators with time delay," *Automatic Control, IEEE Transactions on*, vol. 34, pp. 494-501, 1989.
- [32] Y. Yokokohji and T. Yoshikawa, "Bilateral control of master-slave manipulators for ideal kinesthetic coupling-formulation and experiment," *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, vol. 10, pp. 605-620, 1994.
- [33] R. Anderson and M. W. Spong, "Asymptotic stability for force reflecting teleoperators with time delays," in *Robotics and Automation, 1989. Proceedings., 1989 IEEE International Conference on*, 1989, pp. 1618-1625 vol.3.
- [34] Z. Yong 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, pp. 987-992.

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