

Implementacja sterowania rozmytego dżojstikiem typu haptic na sterowniku PLC

Dominik Rybarczyk, Piotr Owczarek, Grzegorz Pittner

Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania Politechniki Poznańskiej

Streszczenie: Artykuł opisuje implementację układu sterowania dżojstikiem typu haptic w sterowniku PLC. Do jego projektowania wykorzystano metody szybkiego prototypowania systemów sterowania – środowisko Matlab Simulink oraz narzędzie Automation Target for Simulink pakietu Automation Studio firmy Bernerker & Rainer [4]. Dzięki niemu możliwe stało się przeniesienie zaprojektowanego modelu sterowania bezpośrednio do sterownika PLC. W sterowniku nadrzędnym przebadano regulator proporcjonalny i rozmyty, porównując otrzymane wyniki. Sygnał sterujący, wypracowany w sterowniku PLC trafiał na sterowniki silników poszczególnych osi.

Słowa kluczowe: haptic, dżojstik, regulator rozmyty, manipulator

W rozwiązaniach przemysłowych, coraz częściej poszukuje się nowych urządzeń i technik do wzajemnej interakcji maszyny z operatorem. Są to między innymi: panele dotykowe, monitory z obrazami stereoskopowymi, wirtualna rzeczywistość. Artykuł opisuje implementację układu sterowania dżojstikiem z siłowym sprzężeniem zwrotnym (typu haptic) w sterowniku PLC. Dzięki siłowemu sprzężeniu zwrotnemu, operator ma wrażenia fizycznego kontaktu z otoczeniem kontrolowanego obiektu.

1. Wprowadzenie

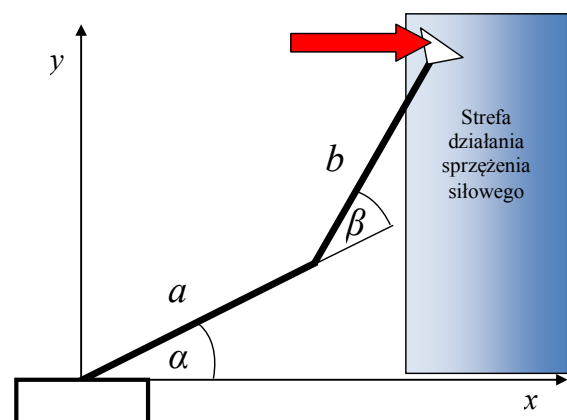
Do sterowania wielu urządzeń stosuje się obecnie różnego rodzaju dżojstiki. W wielu tego typu układach stosowane są złożone systemy sterowania, nie zawsze możliwe do zastosowania w warunkach przemysłowych. Rozwiązaniem problemu jest implementacja układu sterowania dżojstikiem typu haptic w sterowniku PLC.

Sterowniki PLC są obecnie standardem w sterowaniu procesami przemysłowymi. Ręczne napisanie programu sterującego jest bardzo często czasochłonne i wiąże się z możliwością popełnienia licznych błędów, co w skrajnym przypadku może spowodować uszkodzenie maszyny. Z tego względu coraz bardziej popularne stają się wykorzystanie metod szybkiego prototypowania układów sterowania. Przyspieszają one proces projektowania oraz pozwalają na ich bezpieczne sprawdzanie. Metody te polegają na wykorzystaniu graficznego modelowania symulacyjnego do programowania sterowników. Autorzy niniejszej publikacji, wykorzystali tego typu podejście do sterowania dżojstikiem.

2. Opis problemu badawczego

Celem projektu było opracowanie skutecznej metody sterowania dżojstikiem typu haptic przy pomocy sterownika PLC. Układ zbudowany jest z dwuramiennego dżojstika. W jego przegubach zastosowano silniki prądu stałego, sterowane mikrokontrolerem. Są one połączone do sterownika PLC, który pełni rolę nadrzędną. Założono, że sterowany dżojstikiem obiekt napotyka wirtualną przeszkodę, zdefiniowaną w określonym punkcie przestrzeni roboczej. W momencie znalezienia się końcówki efektora w jej obszarze, generowana jest siła przeciwdziałająca ruchowi. Dzięki temu operator, na podstawie siłowego sprzężenia zwrotnego ma możliwość sterowania obiektem, nie widząc go w sposób bezpośredni.

Dżojstik jest typem dwuosowego manipulatora o kinematyce przedstawionej na rys. 1.



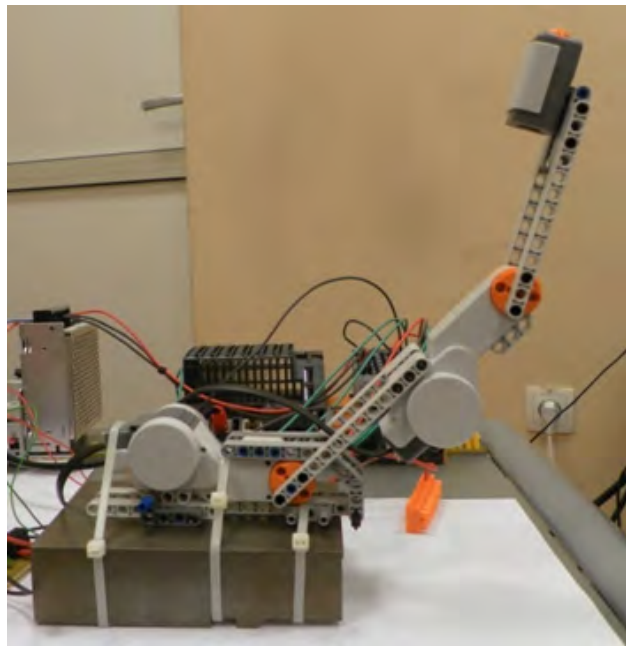
Rys. 1. Schemat kinematyki dżojstika haptic
Fig. 1. Schematic of the haptic joystick kinematic

Pozycję końcówki roboczej efektora wyznaczono przy pomocy równań kinematyki prostej (na podstawie zmiennych przegubowych). Wartości w osi x obliczono przy wykorzystaniu następującej zależności:

$$x = a \cos(\alpha) + b \cos(\alpha + \beta) \quad (1)$$

W momencie przekroczenia pewnej określonej wartości na osi x (początek strefy działania sprzężenia zwrotnego), w przegubach manipulatora pojawia się stopniowo rosnący moment oporowy. Dżojstik wyposażono w silniki prądu stałego sterowane prądowo. Założono, że wartość natężenia

nia prądu jest wprost proporcjonalna do wartości momentu siły na wale silnika. Do sterowania natężeniem prądu silników zastosowano regulator dwupołożeniowy. Regulator nadrzędny (PLC) przeznaczony był do wyznaczania i kształtowania momentów oporu ruchu. Wykorzystano w nim najpierw regulator proporcjonalny, a następnie regulator rozmyty (fuzzy logic regulator).



Rys. 2. Wygląd prototypu mechaniki dżojstika zbudowanego z klocków Lego Mindstorm

Fig. 2. View of the joystick prototype built with Lego Mindstorm

3. Opis układu sterowania

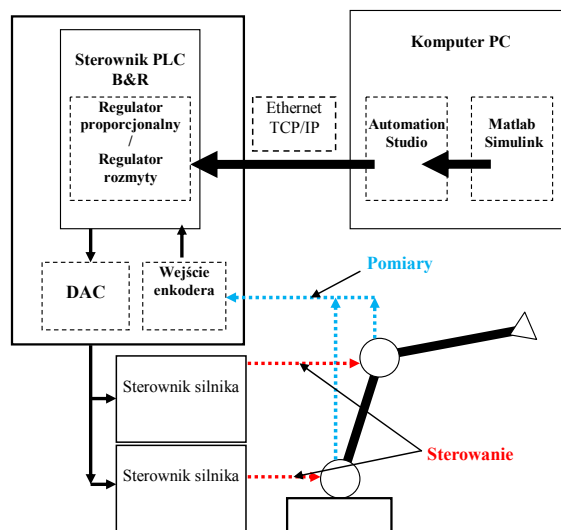
W celu zweryfikowania skuteczności zaproponowanych metod sterowania zbudowano dwuosiowy dżojstik (rys. 2). Na każdej z osi zamontowano enkoder impulsowy, pozwalający na odczytanie pozycji w jakiej aktualnie jest dany przegub manipulatora. Jako hamulce zastosowano silniki DC wraz z przekładniami (przeciwdziałały one ruchowi operatora). Do badań wstępnych wykorzystano klocki Lego Mindstorm.

Układ sterowania składał się z dwóch głównych części: sterownika nadrzędnego oraz podrzędnego sterownika osi silników. Rolę sterownika nadrzędnego spełniał sterownik PLC typu X20, którego producentem jest firma B&R. Do programowania tych sterowników wykorzystano środowisko Automation Studio. Dołączona do niego biblioteka Automation Target for Simulink umożliwiła zintegrowanie systemu ze środowiskiem Real Time Workshop wchodzącego w skład pakietu Matlab Simulink.

Opracowanie układu sterowania dżojstikiem typu haptic wymagało przeprowadzenia następujących czynności:

- teoretyczne opracowanie metody sterowania,
- przygotowanie warstwy sprzętowej:
 - podłączenie układu zasilania sterownika PLC oraz wymaganych modułów wejść/wyjść,

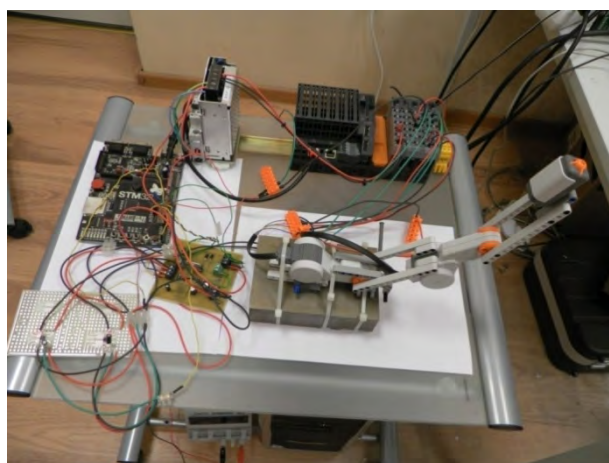
- zaprojektowanie oraz wykonanie sterownika silnikami dżojstika,
- implementacja metody sterowania w programie Matlab Simulink,
- przygotowanie projektu w środowisku Automation Studio,
- przeniesienie kodu ze środowiska Matlab Simulink do sterownika PLC,
- testy układów regulacji.



Rys. 3. Schemat sterownika dżojstika

Fig. 3. The joystick driver

Układ sterowania pracował pod kontrolą systemu operacyjnego czasu rzeczywistego, dzięki czemu obliczenia wykonywane na sterowniku oraz wypracowywane przez niego sygnały spełniały ściśle określone ramy czasowe. Główny program sterujący wykonywany był z częstotliwością 100 Hz.



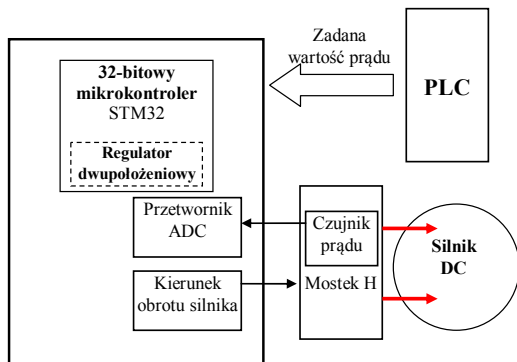
Rys. 4. Widok dżojstika i sterowników

Fig. 4. A view of a joystick and its controllers

Sterownik silnika

W celu wygenerowania odpowiedniego momentu siły na wale silnika DC konieczne stało się zaprojektowanie niezależnego sterownika silników. Do sterowania momentem siły wykorzystano regulację prądową. Układ opierał się na

wydajnym, 32-bitowym mikrokontrolerze STM32F103. Jako stopień mocy posłużył układ L298 pozwalający naysterowanie silnika prądem o natężeniu maksymalnie 2 A. W obwód silnika szeregowo włączono czujnik prądu typu AC71205 firmy Allegro Microsystems, którego działanie wykorzystywało efekt Halla. Napięciowy sygnał wyjściowy trafiał bezpośrednio na 12-bitowy przetwornik ADC mikrokontrolera. W związku z dużą mocą obliczeniową jednostki centralnej możliwe stało się zastosowanie, pracującego z wysoką częstotliwością, dwupołożeniowego regulatora natężenia prądu. Dzięki temu uzyskano dokładność regulacji prądu w zakresie ± 10 mA.



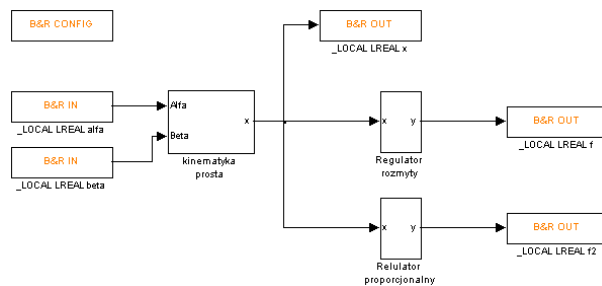
Rys. 5. Elektronika sterująca silnikami prądu stałego
 Fig. 5. The electronic control systems of the DC drives

4. Oprogramowanie sterujące

W związku z zastosowaniem sterownika PLC firmy B&R główny program sterujący opracowano z wykorzystaniem środowiska Automation Studio. Przygotowany w nim projekt składał się z warstwy sprzętowej oraz programowej. W warstwie sprzętowej zdefiniowano zastosowane moduły wejść/wyjść. W przypadku opisywanego projektu dodano moduły obsługujące enkodery impulsowe oraz wyjścia analogowe (kontrolujące sterowniki silników). Algorytm kinematyki prostej oraz sprzężenia siłowego zamodelowano w środowisku Matlab Simulink (rys. 6). Model składał się z następujących części:

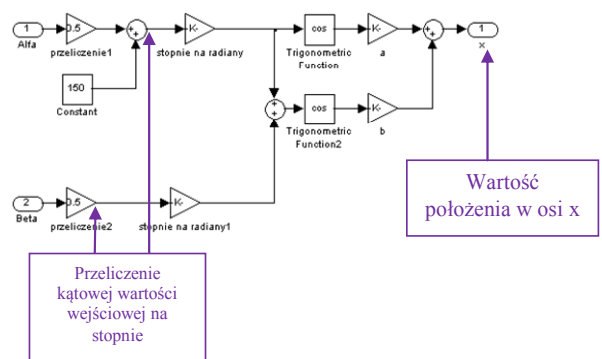
- o modelu kinematyki prostej, na którego wejścia trafiały dane w postaci kątów α i β zmiennych przegubowych, natomiast na wyjściu generowane było położenie końcówki efektora w osi x (rys.7),
- o modelu regulatora proporcjonalnego, w którym definiowano wartość, przy której rozpoczyna się jego działanie, a także wartość wyjściową dla przetwornika DAC sterownika PLC (rys. 8),
- o modelu regulatora rozmytego, w którym definiowano wartość, przy której rozpoczyna się jego działanie, a także przeliczano wartość wyjściową dla przetwornika DAC sterownika PLC (rys. 9).

Model, po kompilacji przez program Real Time Workshop, pakietu Matlab Simulink trafiał bezpośrednio do założonego wcześniej projektu w programie Automation Studio. Między warstwą programową i sprzętową informacje wymieniane były przy pomocy zmiennych lokalnych i globalnych. Tak przygotowany projekt, po skompilowaniu wysyłano do sterownika PLC.



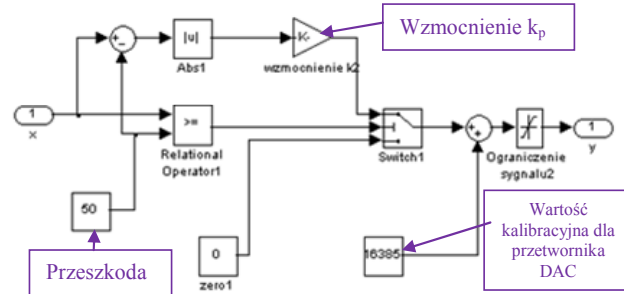
Rys. 6. Układ sterowania dżojstikiem w programie Matlab Simulink

Fig. 6. The joystick control system in Matlab Simulink



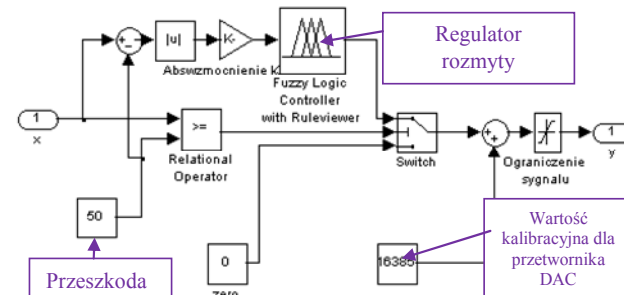
Rys. 7. Implementacja kinematyki prostej w programie Matlab Simulink

Fig. 7. Implementation of the kinematics in Matlab Simulink



Rys. 8. Implementacja regulatora proporcjonalnego w programie Matlab Simulink

Fig. 8. The implementation of the proportional controller in Matlab Simulink



Rys. 9. Implementacja regulatora rozmytego w programie Matlab Simulink

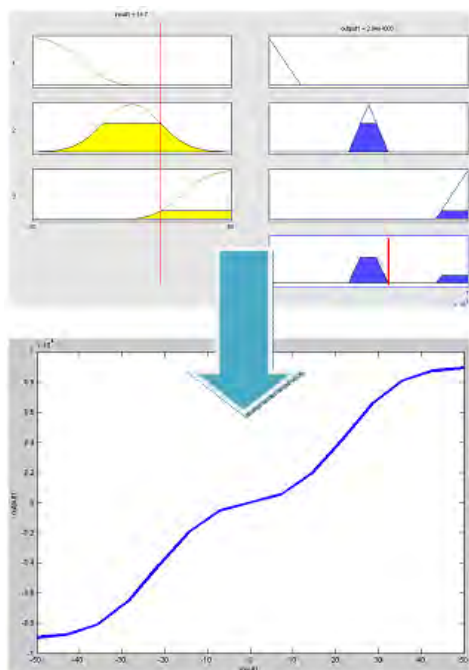
Fig. 9. The implementation of the fuzzy logic controller in Matlab Simulink

5. Badania eksperymentalne

Układ testowano, w ten sposób, że operator przemieszczając końcówkę dźwistka wzdłuż osi x . W momencie „dotknięcia” wyznaczonej wirtualnie strefy (przeszkody) sterownik nadrzędny generował sygnał siły oporu, który za pośrednictwem sterownika mikroprocesorowego był przekazywany do silników. Operator odczuwał wtedy moment oporu ruchu informujący go o przekroczeniu strefy, w której znajduje się wirtualna przeszkoda.

Z uwagi na siłę, która powinna narastać płynnie, nie powodując drgań na poszczególnych osiach, kluczową czynnością podczas projektowania układu sterowania było dobranie odpowiedniego regulatora dla nadrzędnej pętli sterującej siłą przegubów dźwistka. W pierwszej fazie badań zdecydowano się na zastosowanie regulatora proporcjonalnego.

Kolejnym krokiem było znalezienie takiego sposobu sterowania, który pozwoliłby na kształtowanie sygnału wyjściowego siły w szerokim zakresie. W związku z brakiem wystarczających informacji o modelu badanego dźwistka autorzy zdecydowali się na zastosowanie regulatora rozmytego. Schemat implementacji tego regulatora w układzie sterowania przedstawiono na rys. 10. W bloku rozmywania jako funkcje przynależności zastosowano trzy funkcje typu gaussowskiego, natomiast w bloku wyostrzenia - funkcje trójkątne (rys. 10a). Dzięki dobraniu kształtu funkcji przynależności w sposób pokazany na rysunku, uzyskano funkcję pokazaną na rys. 10b.

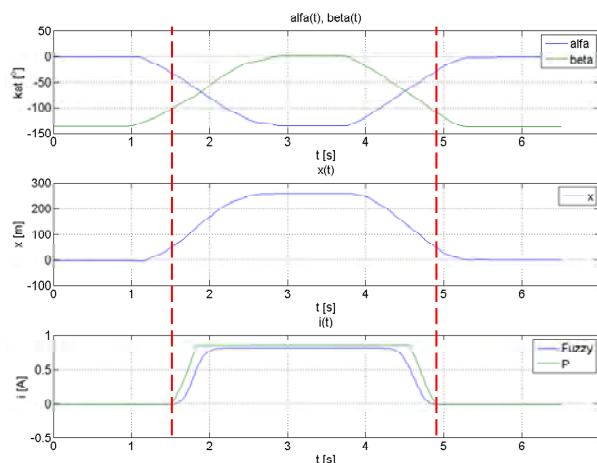


Rys. 10. Funkcje przynależności wejść/wyjść oraz funkcja wyjściowa regulatora rozmytego (Matlab Simulink)

Fig. 10. The membership functions of inputs/outputs and the fuzzy controller output function (Matlab Simulink)

Przed rozpoczęciem badań na rzeczywistym obiekcie autorzy przeprowadzili symulację. Wykresy 11-16 przedstawiają zmiany wartości kątowych w czasie poszczególnych zmiennych przegubowych, zmiany położenia końcówki efektora w osi x oraz zmiany generowanego prądu

trafiającego na silnik. Czerwone linie na wszystkich wykresach oznaczają początek napotkania przeszkody.

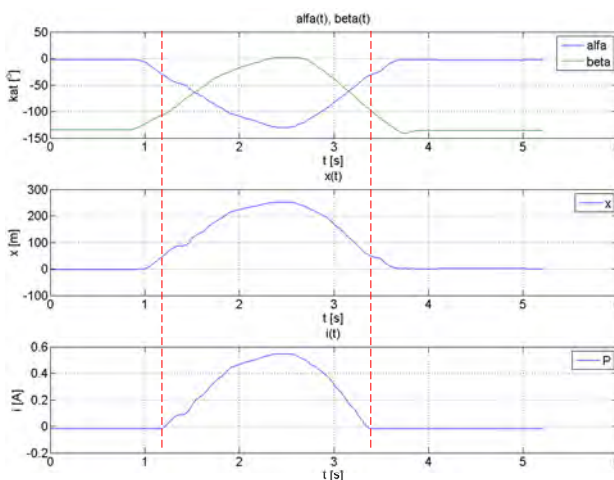


Rys. 11. Wykresy przemieszczeń zmiennych przegubowych, końcówki efektora oraz prądu generowanego na silniku – badania symulacyjne

Fig. 11. Charts of the junction displacement variables, the effector position and the current generated on the motor – simulation researches

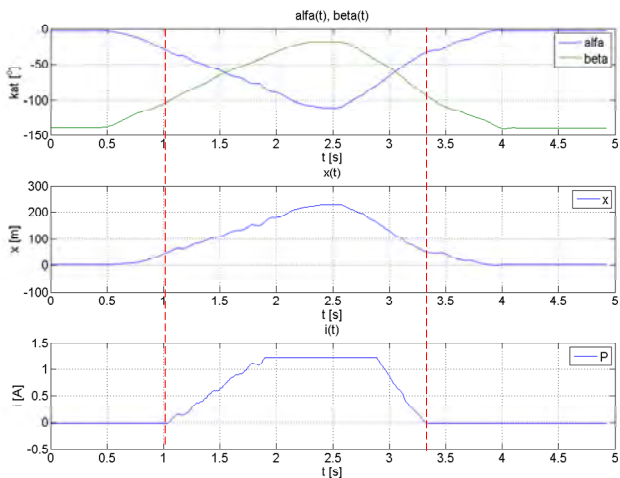
Badania symulacyjne (rys. 11) pokazały, że sterowanie rozmyte zapewnia bardziej płynne zmiany sygnału podawanego na silniki.

W trakcie badań doświadczalnych, najpierw silniki dźwistka sterowano regulatorem proporcjonalnym. Wartości współczynnika wzmocnienia, przy których nie występowały oscylacje w układzie wynosił $k_p=30$ V/A (rys. 12). Niestety przy takim wzmocnieniu uzyskiwano stosunkowo niską wartość prądu na silnikach i operator nie odczuwał efektu napotkania wirtualnej przeszkody. Dodatkowo, w trakcie badań zauważono istotny problem wynikający z konstrukcji mechanicznej dźwistka, a mianowicie występowania luzów na przekładni, które były wyraźnie odczuwane przez operatora.



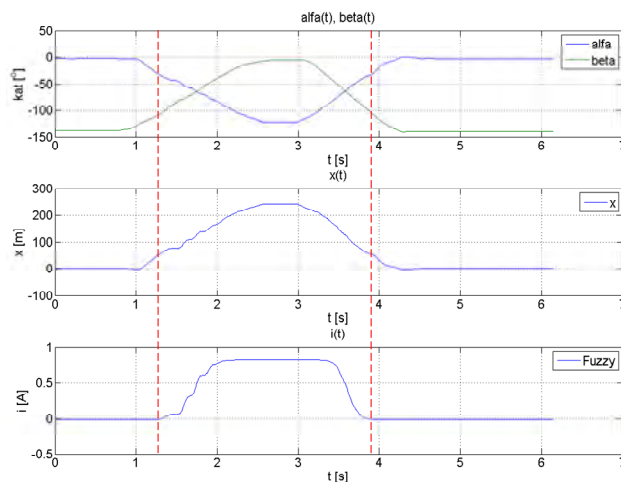
Rys. 12. Wykresy przemieszczeń zmiennych złączowych, końcówki efektora oraz prądu generowanej na silniku dla regulatora proporcjonalnego $k_p=30$

Fig. 12. Charts of the junction displacement variables, the effector position and the current generated on the motor – proportional regulator $k_p=30$



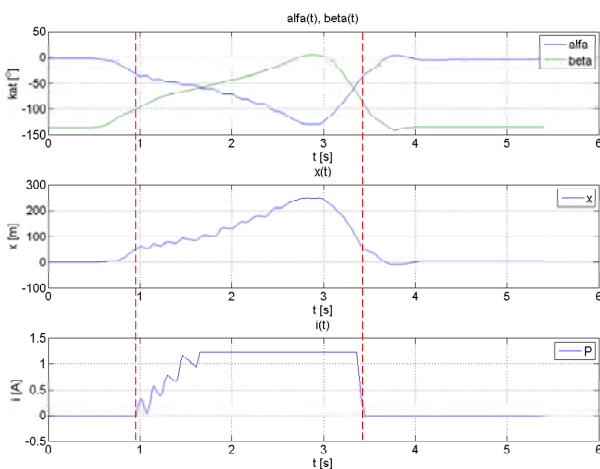
Rys. 13. Wykresy przemieszczeń zmiennych złączowych, końcówki efektora oraz prądu generowanej na silniku dla regulatora proporcjonalnego $k_p=120$

Fig. 13. Charts of the junction displacement variables, the effector position and the current generated on the motor – proportional regulator $k_p=120$



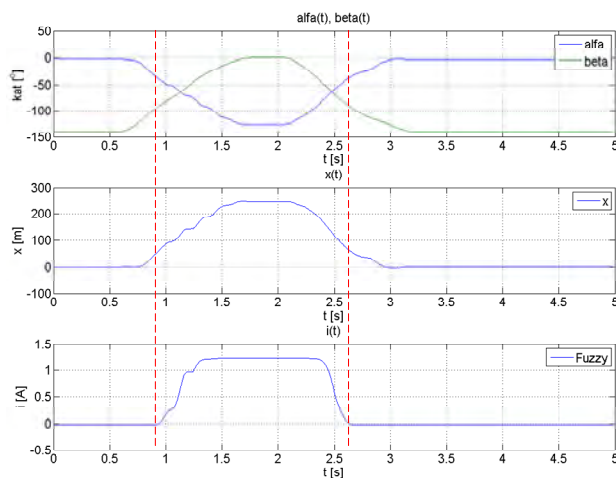
Rys. 15. Wykresy przemieszczeń zmiennych złączowych, końcówki efektora oraz prądu generowanej na silniku dla regulatora rozmytego (prąd do 0,8 A)

Fig. 15. Charts of the junction displacement variables, the effector position and the current generated on the motor – fuzzy logic regulator (for the current 0,8 A)



Rys. 14. Wykresy przemieszczeń zmiennych złączowych, końcówki efektora oraz prądu generowanej na silniku dla regulatora proporcjonalnego $k_p=300$

Fig. 14. Charts of the junction displacement variables, the effector position and the current generated on the motor – proportional regulator $k_p=300$



Rys. 16. Wykresy przemieszczeń zmiennych złączowych, końcówki efektora oraz prądu generowanej na silniku dla regulatora rozmytego (prąd do 1,2 A)

Fig. 16. Charts of the junction displacement variables, the effector position and the current generated on the motor – fuzzy logic regulator (for the current 1,2 A)

Aby zwiększyć moment oporu ruchu zwiększono współczynniki wzmocnienia regulatora (rys. 13 i 14). Jednak skutkiem tego było występowanie dużych drgań ruchu dźwojstika. Były one nie do zaakceptowania i w związku z tym postanowiono zastosować i wykonać badania przy sterowaniu dźwojstika regulatorem rozmytym. Jego działanie sprawdzono dla dwóch wartości prądu. W związku ze specyficznym ukształtowaniem funkcji wyjściowej regulatora, otrzymane przebiegi, mimo stosunkowo dużej wartości prądu na silnikach, cechowały się znacznie mniejszymi oscylacjami. Przekładało się to na wyraźne zwiększenie komfortu obsługi (odczuwania) dźwojstika.

6. Wnioski

W artykule opisano system sterowania wirtualnym manipulatorem za pośrednictwem dźwojstika typu haptic. Wykonany model fizyczny tego dźwojstika oraz zaproponowano zastosowanie dwupoziomowego regulatora systemu. Regulator niższego poziomu zaimplementowano w mikrokontrolerze a regulator wyższego poziomu w sterowniku PLC. Do jego programowania zastosowano i zintegrowano oprogramowanie AS... i MS. Pozwoliło to na szybkie modelowanie oraz uruchomienie sterowania.

Opisywany sposób sterowania został zaimplementowany w sterowniku PLC, co w znacznym stopniu zwiększa

walory praktycznego zastosowania opisywanego rozwiązania w przemyśle. Ręczne napisanie programu regulatora rozmytego w języku ANSI C mogłoby powodować spore trudności. Autorzy rozwiązali problem, stosując metody szybkiego prototypowania układów sterowania. Dzięki temu mogli skupić uwagę na istocie problemu, budując strukturę regulatora przy pomocy odpowiednich bloków funkcyjnych w środowisku Matlab Simulink.

Najpierw przeprowadzono badania z zastosowaniem regulatora typ P a następnie regulatora rozmytego. To drugie rozwiązanie okazało się być bardziej skuteczne.

Regulatory rozmyte znalazły szerokie zastosowanie w sterowaniu procesami wymagającymi automatycznej regulacji. Nadal jednak brakuje publikacji dotyczących wykorzystania ich w dźwostkach typu haptic. Przeprowadzone badania miały na celu sprawdzenie wykorzystania ich możliwości w sterowaniu tego typu układami. Główne zalety opisywanej metody to możliwość kształtowania wyjściowego sygnału sterującego prądem silnika bez dokładnej znajomości modelu obiektu sterowania.

Nad zastosowaniem nowych metod sterowania dźwostkami typu haptic prowadzone będą dalsze badania. Weryfikacji wymaga przede wszystkim zachowanie układu w warunkach zmiennego obciążenia oraz wykorzystania modeli nieliniowych. Prowadzone badania mają na celu stworzenie systemu, który pozwoli na sterowanie trójosiowym manipulatorem z napędem hydraulicznym pracującym w ograniczonej widoczności.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2010-2012 jako projekt badawczy pt. "Zastosowanie metod sztucznej inteligencji do nadzorowania pracy urządzeń mechatronicznych z napędami elektrohydraulicznymi sterowanymi bezprzewodowo"

Bibliografia

1. Milecki, A., Myszkowski A., Chciuk M., *Applications of magnetorheological brakes in manual control of lifting devices and manipulators* [in:] *11th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions*, Dresden 2008.
2. Chciuk M., Myszkowski, A., *Wykorzystanie trzyosiowego dźwostka dotykowego z cieczą magnetoreologiczną i siłowym sprzężeniem zwrotnym do sterowania ramionami robota*. „Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji”, vol. 28, nr 4, 2008, 35—4.
3. Jezierski E., *Dynamika robotów*. WNT, 2005.
4. www.br-automation.com. ■

Implementation of the haptic fuzzy controller in the PLC

Abstract: The article describes the implementation of a haptic joystick control in the PLC. Authors used the rapid prototyping methods in designed the control systems - Simulink Matlab environment and B&R Automation Simulink Target for Automation Studio tool. The control signal which was generated in the PLC has been sent to the motor drivers hit of each axis. The primary driver was tested with fuzzy and proportional controller. The results has been compared. System was tested in the simulation and in the experimental researches.

Keywords: haptic joystick, fuzzy logic controller, manipulator

mgr inż. Dominik Rybarczyk

Asystent w Zakładzie Urządzeń Mechatronicznych Politechniki Poznańskiej

e-mail:

dominik.rybarczyk@put.poznan.pl



mgr inż. Piotr Owczarek

Doktorant w Zakładzie Urządzeń Mechatronicznych Politechniki Poznańskiej

e-mail:

piotr.owczarek@doctorate.put.poznan.pl



mgr inż. Grzegorz Pittner

Asystent w Zakładzie Urządzeń Mechatronicznych Politechniki Poznańskiej

e-mail:

grzegorz.pittner@put.poznan.pl

