

Jacek KORNIAK, Ryszard ROJEKPOLITECHNIKA OPOLSKA, WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI I INFORMATYKI, INSTYTUT AUTOMATYKI I INFORMATYKI,
ul. Sosnkowskiego 31, 45-272 Opole**Sterowanie rozmyte modelem suwnicy przemysłowej**

Dr inż. Jacek KORNIAK

Stopień naukowy doktora nauk technicznych uzyskał w 2005 roku na Politechnice Opolskiej. Pracuje w Instytucie Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej na stanowisku adiunkta. Główny kierunek badań naukowych obejmuje zastosowanie metod sztucznej inteligencji, a przede wszystkim systemów logiki rozmytej, w zagadnieniach modelowania, identyfikacji oraz syntezy sterowania obiektami dynamicznymi.



e-mail: j.korniak@po.opole.pl

Prof. dr hab. inż. Ryszard ROJEK

Jest dyrektorem Instytutu Automatyki i Informatyki na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej. W 2007 roku uzyskał tytuł profesora, specjalizuje się w zakresie modelowania i sterowania procesów o parametrach rozłożonych, syntezy zaawansowanych algorytmów sterowania, zastosowań metod i technik sztucznej inteligencji w automatyce.



e-mail: kaeii@po.opole.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono syntezę sterowania rozmytego suwnicą przemysłową. Celem sterowania jest minimalizacja szkodliwego kołysania przenoszonym ładunkiem. Proponowane rozwiązanie oparte jest o regulator nadrzędny (arbiter), adaptujący wzmacnienia regulatorów położenia oraz kąta odchylenia ładunku w zależności od istniejących warunków. Zastosowanie proponowanego rozwiązania wpływa korzystnie na uzyskane wyniki, wskazując na efektywność prezentowanej metody sterowania, co zdaniem Autora, pozwoli m.in. na zwiększenie dokładności oraz podniesienie poziomu bezpieczeństwa przenoszenia ładunku.

Słowa kluczowe: suwnica przemysłowa, sterowanie rozmyte, sterowanie nadrzędne.

Fuzzy Control of a Trolley Crane Model**Abstract**

The paper presents the anti-swing fuzzy control synthesis for a trolley crane model (Fig. 1). The approach is based on the fuzzy supervisory controller (Fig. 6) updating the gains of the position and the angle fuzzy controllers according to actual conditions (Fig. 2). The main advantages of that approach are high accuracy of crane's position control and the minimizing of load's swing (Fig. 7-8). The effectiveness of the suggested method is particularly emphasized with complying the realistic conditions such as dead-zone in the crane model. The scaling gains for the fuzzy controllers and supervisor controller are experimentally specified (Fig. 3). The gains were not optimized by any methods but the experimental results turned out sufficient. The proposed method of fuzzy control of the trolley crane, in author's opinion, allows to avoid the potential damage of the load in the neighborhood of any industrial materials and ensures high safety of the workers [1, 2, 5, 6].

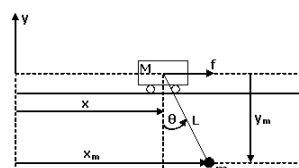
Keywords: trolley crane, fuzzy control, supervisory control.

1. Wstęp

Suwnice przemysłowe są nieodłącznym urządzeniem używanym przy przenoszeniu ładunku. Zadanie stawiane przed operatorem suwnicy polega na takim przemieszczeniu ładunku, aby zapewnić jak najszybszy transport, przy ograniczeniu niepożądanych kołysań. Ma to istotne znaczenie w przypadku m.in. dużych gabarytowo ładunków, ograniczonych rozmiarów hali, położenia innych przedmiotów na drodze transportowej, dynamicznych przeciążeń, ograniczeń eksploatacyjnych, czy wreszcie bezpieczeństwa innych pracowników. Zwykle doświadczony operator wykonuje takie zadanie poprawnie, jednak nie jest on w stanie w każdym przypadku oszacować wagi ładunku, długości liny oraz odległości miejsca docelowego, aby bezpiecznie oraz poprawnie przetransportować ładunek. Zbyt duża przyjęta siła napędowa silników suwnicy może wywołać takie wartości przyspieszeń, które spowodują niebezpieczny efekt kołysania. Błąd operatora może doprowadzić do poważnych zniszczeń ładunku, suwnicy, a także może zagrazić bezpieczeństwu ludzi. Rozwiązania ograniczające te skutki zaprezentowano w [1, 2, 5, 6].

2. Model matematyczny suwnicy

Rys. 1 przedstawia model 2-D wózka suwnicowego o masie M , poruszającego się wzdłuż szyny (współrzędna x) pod wpływem działającej siły f . Suwnica przewozi ładunek o masie m , zawieszony na, odchylającej się o kąt θ , linie o długości L (g - przyspieszenie). Parametry modelu przyjęto z [5, 7].



Rys. 1. Model suwnicy z ładunkiem

Fig. 1. Trolley crane model with the load

Wyznaczenie równań dynamiki systemu uzyskuje się na podstawie poniższych rozważań. Wielkości x_m oraz y_m wynoszą w tym przypadku

$$x_m = x + L \sin \Theta \quad \text{oraz} \quad y_m = -L \cos \Theta. \quad (1)$$

Energia kinetyczna T oraz potencjalna U tego układu przyjmuje postać

$$T = \frac{1}{2} M \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m (\dot{x}_m^2 + \dot{y}_m^2), \quad U = mgy_m = -mgL \cos \Theta. \quad (2)$$

Funkcję Lagrange'a uzyskuje się z różnicy energii $T - U$

$$\begin{aligned} \tilde{L} = T - U = & \frac{1}{2} M \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m (\dot{x}^2 + L^2 \dot{\Theta}^2 + 2\dot{x}\dot{\Theta}L \cos \Theta) \dots \\ & \dots - mgL \cos \Theta. \end{aligned} \quad (3)$$

Uogólniona postać s (liczba stopni swobody $i=1\dots s$) równań Lagrange'a drugiego rodzaju jest postaci

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \tilde{L}}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial \tilde{L}}{\partial q_i} = Q_i, \quad (4)$$

gdzie: q – wektor uogólnionych współrzędnych, Q – wektor uogólnionych sił. Przyjmując oznaczenia z rys. 1 dla wektora $q = [x \ \theta]^T$ uzyskuje się układ

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \tilde{L}}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial \tilde{L}}{\partial \theta} = 0 \quad \text{oraz} \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \tilde{L}}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial \tilde{L}}{\partial x} = f. \quad (5)$$

Wyznaczając pochodne równania (3) uzyskuje się następujące zależności

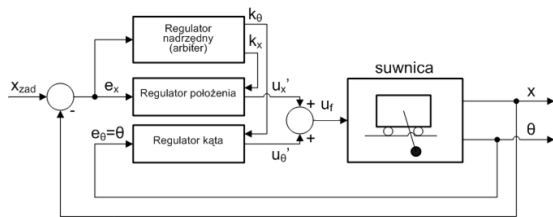
$$\ddot{x} \cos \Theta + L \ddot{\Theta} - g \sin \Theta = 0, \quad (6)$$

$$(m + M)\ddot{x} + mL(\ddot{\Theta} \cos \Theta - \dot{\Theta}^2 \sin \Theta) = f.$$

3. Synteza sterowania suwnicą

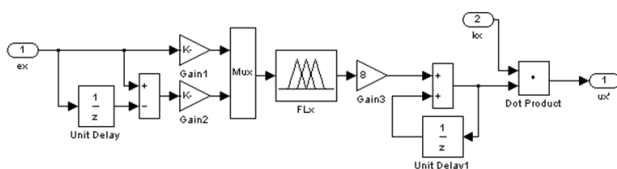
Zaproponowany system sterowania suwnicą z ładunkiem opiera się na dwóch regulatorach rozmytych (rys. 2), których zadaniem jest odpowiednio dokładne przemieszczenie ładunku (regulator FL_x) oraz stabilizacja i ograniczenie kołysania ładunku (regulator FL_θ). Efektywność stosowania sterowania rozmytego nie wymaga konieczności użycia dokładnego modelu matematycznego obiektu, którego złożoność (w tym nieliniowość) często wpływa na proces obliczeniowy w syntezie sterowania [4, 6, 7]. W celu zapewnienia uchybu statycznego zarówno w torze położenia x oraz w torze stabilizacji kąta θ , zaproponowano struktury regulatorów rozmytych opierając się o algorytm przyrostowy PI. Reguły sterowania rozmytego dobrano natomiast tak, aby działanie regulatorów odzwierciedlało metodę regulacji z tzw. linią przełączeń (podobnie jak dla regulatorów ślizgowych) [3, 4, 5].

W zastosowanym sposobie sterowania istotną rolę odgrywa regulator nadrzędny (tzw. arbiter, FL_a), którego działanie również oparte jest na metodach rozmytych. Wpływa on na regulatory na FL_x oraz FL_θ , zapewniając adaptacyjne dobranie ich wzmacnień w zależności od odległości suwnicy od celu składowania ładunku. Działanie adaptacyjne, poprzez zastosowanie odpowiedniej struktury regulatora nadrzędnego oraz przez eksperymentalne dobranie reguł regulatora rozmytego FL_a , „osłabia” wpływ regulatora położenia FL_x , natomiast wzmacnia działanie regulatora położenia FL_θ , w miarę zbliżania się suwnicy do celu. Takie podejście, jak pokazują wyniki eksperymentalne, zapewnia ograniczenie efektu kołysania ładunkiem przy zbliżaniu się suwnicy do celu. Zbliżoną metodę sterowania z regulatorem przełączającym zaprezentowano w [2], jednak nie ograniczono tam w znaczący sposób efektu kołysań.



Rys. 2. Schemat strukturalny sterowania rozmytego suwnicą
Fig. 2. Structural diagram of fuzzy control of trolley crane

Regulator położenia (podobnie jak regulator kąta) funkcjonuje w oparciu o system rozmyty FL_x (rys. 3), działający na bazie regulatora PI o algorytmie przyrostowym: $\Delta u_x = f(e_x, \Delta e_x)$, gdzie e_x oznacza odległość do celu, Δe_x to prędkość suwnicy, natomiast Δu_x to przyrost wartości sterowania (np. mocy) [2, 3, 4]. Bezpośrednia wartość sterowania u_x wyznaczana jest na podstawie sumy Δu_x oraz wartości sterowania u_x z poprzedniego kroku obliczeniowego.

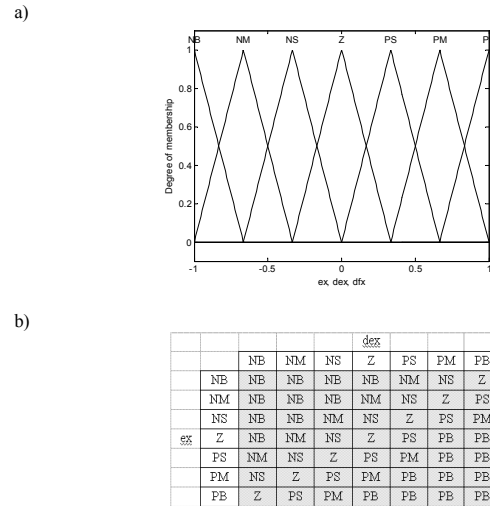


Rys. 3. Struktura regulatora rozmytego FL_x (położenia)
Fig. 3. Scheme of fuzzy controller FL_x (position control)

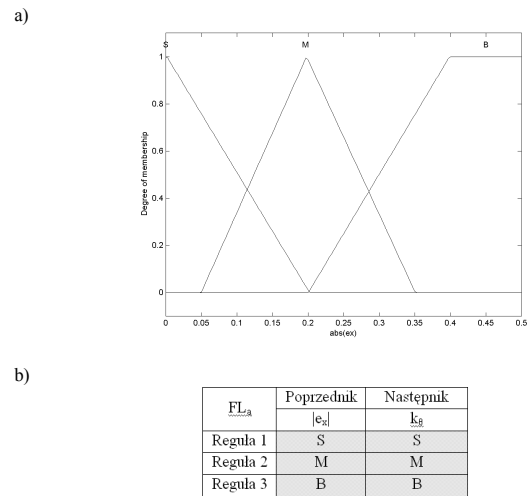
Rozkład funkcji przynależności dla zmiennych e_x , Δe_x oraz Δu_x , znormalizowany do przedziału $\langle -1, 1 \rangle$, oraz bazę reguł dla regulatora FL_x przedstawiono na rys. 4.

Wpływu na przestrzeń sterowań regulatora FL_x dokonuje się za pomocą wzmacniaczy skalujących (rys. 3), których wartości

wzmocnień dobrano eksperymentalnie. Sygnały wyjściowe regulatorów położenia u_x oraz kąta u_θ stanowią składowe całkowitego sygnału sterującego $u_f = u_x + u_\theta$. Sygnał ten zostaje wypracowany z wykorzystaniem adaptacyjnego oddziaływania regulatora nadrzędnego (arbitra). Sygnały u_x oraz u_θ generowane są w następujący sposób: $u_x = k_x \cdot u_x$ oraz $u_\theta = k_\theta \cdot u_{x\theta}$. Współczynniki k_x oraz k_θ generowane są za pomocą regulatora rozmytego FL_a typu Sugeno, którego funkcje przynależności dla zmiennej $|e_x|$ oraz bazę reguł prezentuje rys. 5.



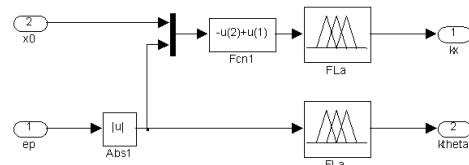
Rys. 4. Parametry regulatora FL_x : a) funkcje przynależności, b) baza reguł
Fig. 4. Parameters of FL_x : a) membership functions, b) rule base



Zbiór wartości dla zmiennej k_θ : S=0.5, M=1.25, B=2.0 (dobre eksperymentalnie)

Rys. 5. Parametry regulatora FL_a : a) funkcje przynależności, b) baza reguł
Fig. 5. Parameters of FL_a : a) membership functions, b) rules base

Regulator rozmyty FL_a stanowi główną część struktury regulatora nadrzędnego (arbitra) (rys. 6). Jego rola polega na takim wypracowaniu wartości współczynników k_x oraz k_θ , aby w miarę zbliżania się suwnicy do celu nastąpiło wzmocnienie działania regulatora kąta, podczas gdy działanie regulatora położenia powinno zostać w odpowiednim stosunku „osłabione”.

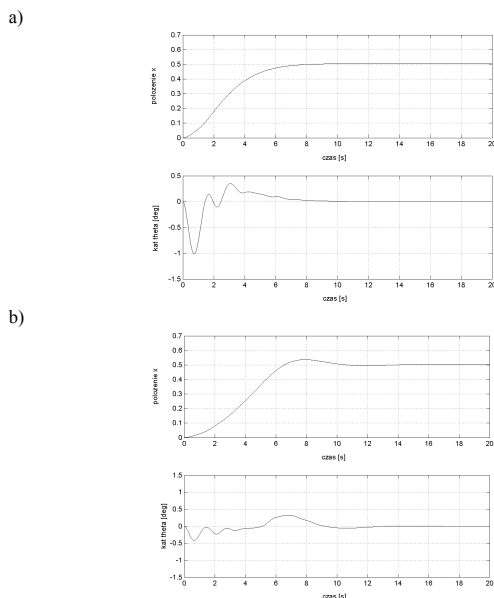


Rys. 6. Schemat strukturalny rozmytego regulatora nadrzędnego (arbitra)
Fig. 6. Structural diagram of supervisor fuzzy controller

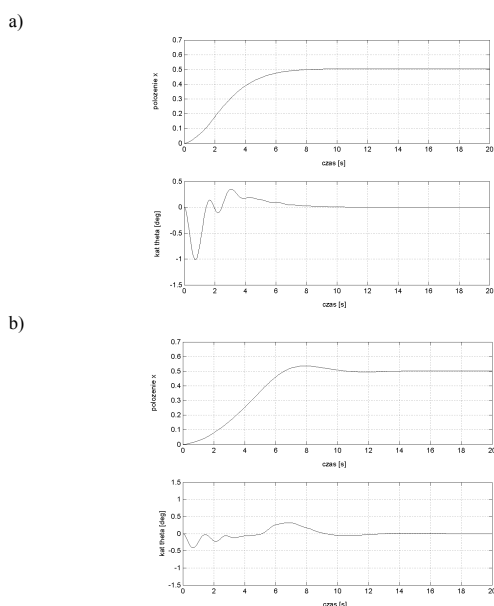
Taka metoda działania wynika ze zmodyfikowania przestrzeni wejściowej dla zmiennej $|e_{x1}|$, dzięki której można wymusić „osłabione” działanie regulatora położenia, podczas gdy działanie regulatora kąta zostaje „wzmocnione”.

4. Wyniki badań eksperymentalnych

Doświadczenia eksperymentalne dotyczące zastosowania sterowania rozmytego suwnicą z ładunkiem zrealizowano za pomocą oprogramowania MATLAB/Simulink. W pierwszej kolejności dopasowano oraz strojono regulatory rozmyte położenia oraz kąta, jednak jeszcze bez działania regulatora adaptacyjnego, w drugim – zastosowano regulator nadrzędny (arbiter). Wyniki eksperymentu dla $x_{zad}=0.5$ przedstawia rys. 7, które potwierdzają skuteczność metod rozmytych w przypadku obiektów trudnych (nieliniowych oraz z wewnętrznymi sprzężeniami), jak napędy, czy wózki suwnicowe.



Rys. 7. Przebieg czasowy położenia suwnicy oraz kąta: a) bez arbitra, b) z arbitrem
Fig. 7. Time response of position and angle of crane: a) without supervisor, b) with supervisor



Rys. 8. Przebieg czasowy położenia suwnicy oraz kąta: a) bez arbitra, b) z arbitrem; model z tzw. strefą nieczułości
Fig. 8. Time response of position and angle of crane: a) without supervisor, b) with supervisor; model with dead-zone

Analiza przebiegów z rys. 7 potwierdza efektywność działania regulatora nadrzędnego, czego efektem jest 2-krotne zmniejszenie amplitudy kąta. W trzecim eksperymencie uwzględniono na wejściu modelu (w sygnale u_f) suwnicy element z tzw. strefą nieczułości (od -0.02 do 0.02), niekorzystną w rzeczywistych warunkach przyczyną powstawania niedokładności sterowania. Efekt taki występuje w przypadku napędów suwnicowych zawierających elementy przekładniowe [6]. Rys. 8 przedstawia przebiegi położenia suwnicy oraz kąta w takich warunkach przy braku regulatora nadrzędnego oraz z jego zastosowaniem.

Z analizy przebiegów z rys. 8a wynika, że uwzględnienie strefy nieczułości w modelu suwnicy skutkuje, w przypadku braku regulatora nadrzędnego, pojawieniem się niedokładności sterowania (przy $x_{zad}=0.5$) oraz nieznacznymi i niezaniakającymi kołysaniami ładunku. W ostatnim doświadczeniu zastosowano regulator nadrzędny w sterowaniu suwnicą z uwzględnioną strefą nieczułości na wejściu modelu suwnicy. Wyniki eksperymentu przedstawiono na rys. 8b. Ponownie potwierdzają one efektywność działania regulatora nadrzędnego, czego efektem jest ponad 2-krotne zmniejszenie amplitudy kąta, zwiększenie dokładności sterowania oraz zdecydowane ograniczenie wahań kąta w stanie ustalonym. Weryfikację otrzymanych rezultatów można uzyskać w oparciu o rzeczywisty model suwnicy przemysłowej firmy INTECO, będący na wyposażeniu laboratorium podstaw automatyki Instytutu Automatyki i Informatyki w Politechnice Opolskiej [7].

5. Wnioski

Zaproponowana w artykule metoda sterowania rozmytego suwnicą przemysłową uwzględniająca sterowanie nadrzędne o charakterze adaptacyjnym wpływa korzystnie na uzyskane wyniki. Zaletą takiego podejścia jest uzyskanie dużej dokładności sterowania położeniem wózka suwnicowego, przy jednoczesnym zminimalizowaniu wahań zawieszono ładunku. Efektywność proponowanej metody szczególnie uwidoczniła się przy uwzględnieniu pewnych rzeczywistych warunków w suwnicy na przykładzie modelu ze strefą nieczułości. Zastosowane w regulatorach rozmytych oraz w regulatorze nadrzędnym współczynniki wzmacniające (skalujące) dobrano drogą eksperymentalną. Nie były one poddane optymalizacji, jednak ich zaproponowane wartości już wpływają na uzyskanie korzystnych wyników, wskazując na efektywność prezentowanej metody sterowania. Jej zastosowanie, zdaniem Autora, pozwoli uniknąć ewentualnego zniszczenia ładunku bądź sąsiadujących z nim elementów rozmieszczonych w hali przemysłowej, a także pozwoli podnieść poziom bezpieczeństwa przebywających tam pracowników.

6. Literatura

- [1] Ahmad M.A.: Active Sway Suppression Techniques of a Gantry Crane System. European Journal of Scientific Research, 2009, Vol.27, No.3 p.322-333.
- [2] Chang Ch.Y.: The Switching Algorithm For The Design of Crane Controller. The Proceedings of the 5th Asian Control Conference, 2004, Vol.3, p.1723-1728.
- [3] Driankov D., Hellendoorn H., Reinfrank M.: Wprowadzenie do sterowania rozmytego. WNT, 1996, s. 132-133.
- [4] Korniak J.: Racjonalizacja pracy układu energetycznego samochodu osobowego z wykorzystaniem logiki rozmytej. Rozprawa doktorska, Politechnika Opolska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Opole, 2005.
- [5] Lin C.M., Chin W.L.: Adaptive Hierarchical Fuzzy Sliding-Mode Control for a Class of Coupling Nonlinear Systems, Int. J. Cont. Math. Sci., 2006, Vol. 1, p.177-204.
- [6] Nguyen H. and others: Model Predictive Control of Gantry Crane with Input Nonlinearity Compensation. Proceedings of World Academy of Science, Engineering And Technology 2009, Vol.38, p.312-316.
- [7] www.inteco.com.pl, 3DCrane User's Manual.