

**Mariusz GIERGIEL, Piotr MAŁKA**

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA, WYDZIAŁ INŻYNIERII MECHANICZNEJ I ROBOTYKI, KATEDRA ROBOTYKI I DYNAMIKI MASZYN

**Algorytmy rozmyte w sterowaniu minirobotu kołowego.****dr hab. inż. Mariusz GIERGIEL**

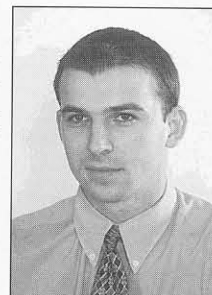
Jest pracownikiem w Katedrze Robotyki i Dynamiki Maszyn AGH. Jego główne zainteresowania to komputerowe wspomaganie prac inżynierskich, zastosowanie mechatronicznego podejścia w projektowaniu, budowa i programowanie mikro robotów.

giergiel@agh.edu.pl

**mgr inż. Piotr MAŁKA**

Jest doktorantem w Katedrze Robotyki i Dynamiki Maszyn AGH. Jego główne zainteresowania to wykorzystanie sztucznej inteligencji w robotyce i mechatronice. Skonstruował minirobotu mobilnego, który wykorzystywany jest do badań symulacyjnych.

piomal@poczta.fm

**Streszczenie**

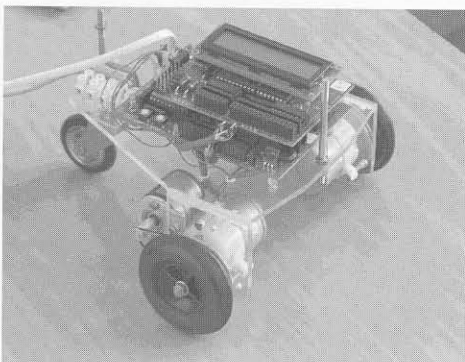
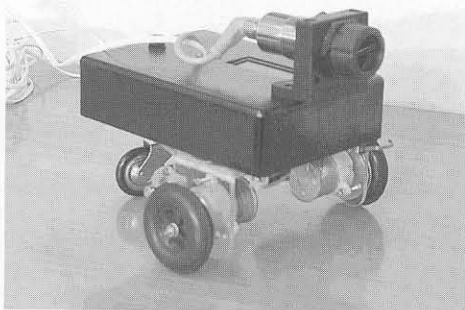
W artykule pokazano sposób wykorzystania algorytmów rozmytych do modelowania dynamiki układów. Sygnały wykorzystane w analizie i symulacji numerycznej otrzymano z obiektu rzeczywistego - minirobot mobilny. Obliczenia numeryczne wykonano w środowisku programu Matlab™/Simulink. Przewidziano również szczegółowo budowę układu z członem kompensującym i stabilizującym wykonanym z wykorzystaniem algorytmów rozmytych jak również porównanie do układu z wykorzystaniem sieci neuronowych.

**Abstract**

The article demonstrate mode of utilization of fuzzy logic to simulation of dynamic systems. Real data, received from real object - mobile minirobot, has been used to simulations and analysis. Numerical calculations have been done in the Matlab™-Simulink programme environment. Detailed structure of system with fuzzy logic compensates and stabilizing element has been shown and comparison to system with neural network.

**1. Wstęp**

Zagadnienie związane ze sterowaniem mobilnymi robotami kołowymi jest złożone, co wynika z faktu, że obiekty te są układami nieliniowymi, nieholonomicznymi, wielowymiarowymi. Kwestie modelowania zadania odwrotnego dynamiki analizowane są w wielu pracach [1,2,3,4,8,12].

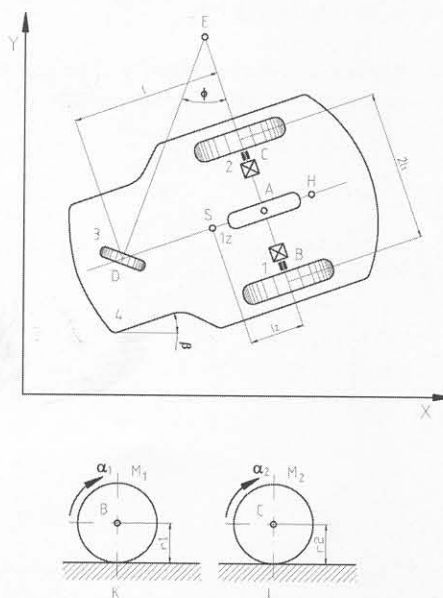


Rys. 1.1. Minirobot mobilny

W niniejszej pracy do modelowania zadania odwrotnego dynamiki dwukołowego mobilnego minirobotu zastosowano metody sztucznej inteligencji, które nie wymagają form liniowych ze względu na parametry modelu. Przedstawione rozważania teoretyczne zadania odwrotnego dynamiki mobilnego minirobotu kołowego zostały zilustrowane badaniami symulacyjnymi wykonanymi przy użyciu pakietu MATLAB™/SIMULINK. Weryfikacje otrzymanych wyników dokonano na obiekcie rzeczywistym - minirobot kołowy, który został zbudowany w Katedrze Robotyki i Dynamiki Maszyn Akademii Górniczo-Hutniczej w ramach grantu KBN 5T07C00722 "Zastosowanie metod sztucznej inteligencji w mechatronicznym projektowaniu mobilnych robotów kołowych".

**2. Równania dynamiki ruchu minirobotu mobilnego.**

W pracy przyjęto 2-kołowy model M.MR.K., który rozpatrywano na podstawie prac [1,3,4,5,8,12]. Analizując dynamikę mobilnego robota kołowego niezbędne jest dobranie odpowiedniego modelu. Jak wiadomo z prac [1,3,4], korzystne jest przyjęcie modelu, w którym występują tylko dwa koła jezdne.



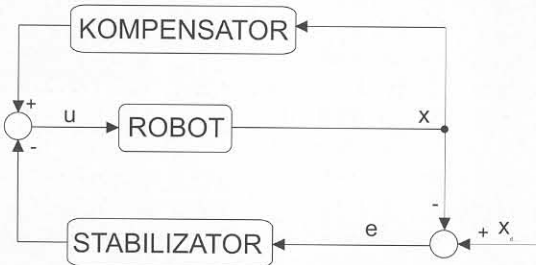
Rys. 2.1. Schemat konstrukcji minirobotu mobilnego

Szczegółowy opis przyjętych założeń teoretycznych zawarty został w artykule opublikowanym w PAK maj 2004, który to zawierał opis badań nad dynamiką minirobotu z wykorzystaniem, sieci neuronowych.

### 3. Sterowanie nadążne off-line z wykorzystaniem algorytmów rozmytych mobilnego minirobotu kołowego.

Układy sterowania [2,5,6,8,12] zbudowane są ze sprzężenia kompensującego nieliniowości obiektu, oraz sprzężenia zwrotnego stabilizującego błąd nadążania. W zadaniu analizowano syntezę sterownika rozmytego, w którym część kompensacyjna ma za zadanie realizację zadania odwrotnego dynamiki, realizowane jest to na drodze linearyzacji układu wejście-wyjście.

Poniżej pokazany jest schemat ogólny układu sterowania z członem kompensacyjnym:



Rys.3.1. Ogólny schemat blokowy układu sterowania z członem kompensacyjnym.

W przestrzeni stanu równania opisujące rozważany obiekt mają postać [7,9].

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, a) + G(x, a)u \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (3.1)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} f(x) &= [f_1(x, a) \quad f_2(x, a)]^T \in R^n, \quad G(x) \in R^{n \times n} \\ G(x, a) &= [[g_1(x, a) \quad g_2(x, a)]^T, [g_3(x, a) \quad g_4(x, a)]^T] \end{aligned} \quad (3.2)$$

Stosując linearyzację modelu wyznaczany sygnał sterowania:

$$u = G(x)^{-1}(-f(x) + v), \quad \det G(x) \neq 0 \quad (3.3)$$

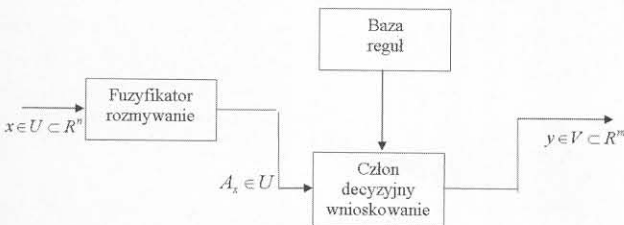
gdzie:

- $v = -K_D s - Y_d$  - sygnał sprzężenia zwrotnego;
- $u_c = G(x)^{-1} f(x)$  - sygnał kompensacji nieliniowości obiektu;
- $e = x - x_d$  - błąd stanu układu;
- $x_d = [q_{2d} \quad \dot{q}_{2d}]^T$  - wektor opisujący zadaną trajektorię ruchu punktu H;
- $s = \Lambda^T e$  - uogólniony błąd nadążania;
- $Y_d = -\ddot{x}_d + \lambda \dot{e}$  - znany sygnał;

Zakładamy, że funkcje  $f(x), G(x)$  nie są dokładnie znane, dlatego sygnał sterowania  $u$  zapiszemy w następującej postaci

$$u = \hat{G}(x)^{-1}(-\hat{f}(x) + v) \quad (3.4)$$

Do aproksymacji nieliniowych funkcji występujących w równaniu (3.1) można zastosować algorytm rozmyty typu TAKAGI SUGENO [2,9,10,11], o strukturze pokazanej na rysunku 3.2.



Rys.3.2. Schemat modelu rozmytego.

Analizowany model rozmyty TAKAGI-SUGENO charakteryzuje baza reguł, których część JEŻELI ma charakter rozmyty, natomiast w części TO występują zależności funkcyjne:

R<sub>j</sub>: JEŻELI  $x_1$  jest  $A_1^j$  I  $x_2$  jest  $A_2^j$  ... I  $x_n$  jest  $A_n^j$  TO  $y_j = g_j(x_1, x_2, \dots, x_n)$

Przyjmując na wejściu bloku wnioskowania zbiór rozmyty  $A_x$  z t-normą typu minimum lub maksimum

$$\begin{aligned} \mu_{A_1^j \dots A_n^j}(x) &= \min[\mu_{A_1^j}, \dots, \mu_{A_n^j}] \\ \mu_{A_1^j \dots A_n^j}(x) &= \max[\mu_{A_1^j}, \dots, \mu_{A_n^j}] \end{aligned} \quad (3.5)$$

na wyjściu modelu rozmytego Takagi-Sugeno, otrzymano sygnał równy znormalizowanej sumie ważonej poszczególnych wyjść  $\bar{y}_j$

$$y(x) = \frac{\sum_{j=1}^M \bar{y}_j \tau_j}{\sum_{j=1}^M \tau_j} \quad (3.6)$$

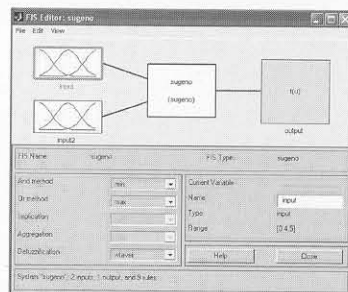
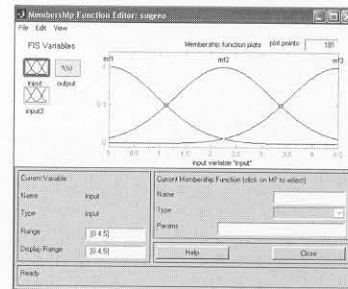
gdzie:

$$\tau_j = \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^j}(x_i) \quad (3.7)$$

jest poziomem zapłonu j-tej reguły.

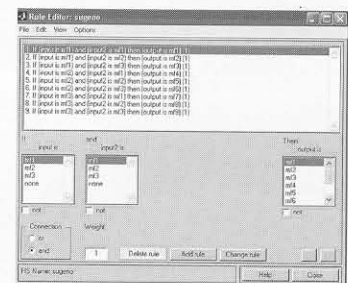
Blok rozmywania przekształca przestrzeń wejść w postaci  $X = [\alpha_1, \alpha_2] \subset R^n$  w zbiór rozmyty  $A \in X$  scharakteryzowany funkcją przynależności  $\mu_A(x): X \rightarrow [0,1]$ , czyli wyznacza stopień przynależności do poszczególnych zbiorów rozmytych. Na rys.3.3 przedstawiono przyjęte funkcje przynależności w postaci funkcji Gaussa (gaussmf) wraz z przedziałami zmienności wejść wynikającymi z zakresu prędkości możliwych do osiągnięcia przez minirobota MRM,  $\alpha_1 \in [0,4.5], \alpha_2 \in [0,4.5]$ .

Do wykonania układu sterowania zastosowano układ z logiką rozmytą wykonany w programie Matlab™, który umożliwia tworzenie modeli rozmytych przy użyciu dodatkowego zestawu opcji (fuzzy logic toolbox)[13], narzędzie to bardzo ułatwia proces projektowania i doborzenia parametrów układu.



Rys.3.3. Funkcje przynależności oraz przedziały zmienności dla  $\alpha_1$  i  $\beta$

Baza reguł dla opisanego modelu została przyjęta w postaci przedstawionej na rys.3.4., ponieważ dla poszczególnych wejść układu rozmytego przyjęto 3 funkcje przynależności, zatem w bazie reguł utworzono 9 reguł wnioskowania i przyjęto zasadę opisu reguł, każda reguła z jednego wejścia z każdą regułą drugiego wejścia.



Rys.3.4. Baza reguł

Na wyjściu modelu rozmytego Takagi-Sugeno, otrzymano sygnał równy znormalizowanej sumie ważonej poszczególnych wyjść  $\bar{y}_j$

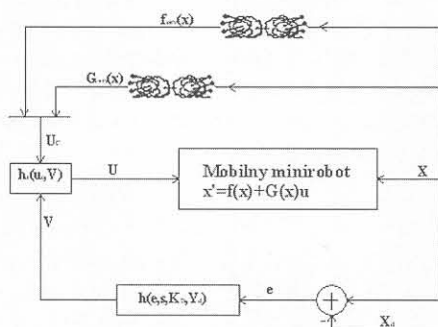
### 4. Weryfikacja numeryczna.

Celem przeprowadzonych badań symulacyjnych układu sterowania z kompensatorem [2,4,7,8,9,10,11,13] jest ograniczenie błędów wynikających z nieliniowego charakteru obiektu badanego. Rolę kompensatora pełni algorytm rozmyty, którego zadaniem jest aproksymacja funkcji nieliniowej  $f(x)$ . Funkcja ta ma postać wektorową, a jej rozwiązaniem są dwa równania. Wymusza to zastosowanie dwu algorytmów rozmytych. Każde z tych równań jest funkcją dwu zmiennych  $\alpha$  i  $\beta$ .

W niniejszym artykule pokazano również porównanie otrzymanych wyników z wykorzystaniem algorytmów rozmytych do wyników, jakie uzyskano stosując sieci neuronowe [12].

Z uwagi na założenie prostoliniowej trajektorii ruchu mobilnego robota ( $\beta=0$ ) zależność  $G(x)$  nie jest estymowana algorytmem rozmytym, ze względu na możliwość jej określenia drogą analityczną.

W celu zanalizowania powyższego układu sterowania zbudowano odpowiedni układ w programie MATLAB/SIMULINK, który pokazano poniżej.

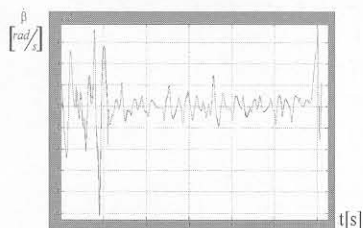


Rys.4.1. Schemat blokowy układu sterowania z członem kompensującym z wykorzystaniem algorytmu rozmytego.

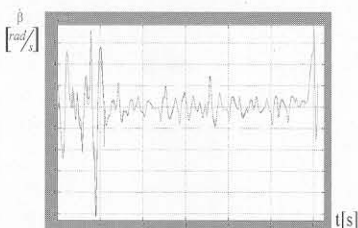
Sygnały wejściowe wprowadzane do układu sterowania uzyskano z obiektu rzeczywistego (Minirobot mobilny) na podstawie pomiarów. Dane wejściowe zmierzono za pomocą sterownika Handy Board i dołączonych do niego czujników pomiarowych.

Symulacje, jakie wykonano w zbudowanym minirobocie kołowym miały na celu znalezienie optymalnego rozwiązania tak, by błąd pomiędzy sygnałem rzeczywistym, a uzyskanym na drodze symulacji był minimalny. Drugim warunkiem, jaki miał wpływ na uzyskane wyniki, to czas symulacji oraz złożoność układu sterowania.

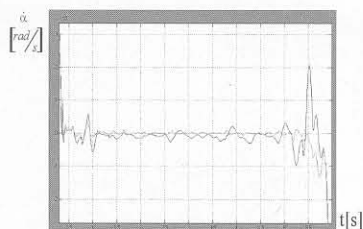
Poniższe charakterystyki pokazują uzyskane wyniki:



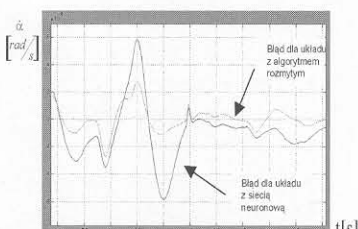
Rys. 4.2. Błąd odwzorowania prędkości kątowej  $\beta$ .



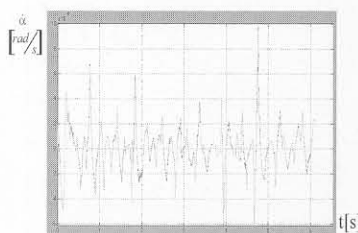
Rys. 4.3. Błąd odwzorowania prędkości kątowej  $\beta$  powiększ.



Rys. 4.4. Błąd odwzorowania prędkości kątowej  $\alpha$ .



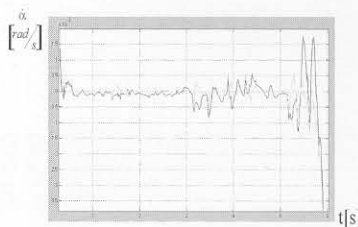
Rys. 4.5. Błąd odwzorowania prędkości kątowej  $\alpha$  powiększ.



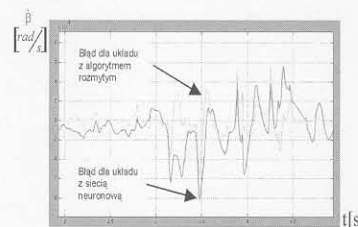
Rys. 4.6. Błąd odwzorowania prędkości kątowej  $\beta$ .



Rys. 4.7. Błąd odwzorowania prędkości kątowej  $\beta$  powiększ.



Rys. 4.8. Błąd odwzorowania prędkości kątowej  $\alpha$ .



Rys. 4.9. Błąd odwzorowania prędkości kątowej  $\alpha$  powiększ.

Powyższe charakterystyki przedstawiają przebiegi czasowe błędów odwzorowania prędkości kątowych  $\alpha$  (rys. 4.4 bez zakłócenia, rys. 4.8 z zakłóceniem),  $\beta$  (rys. 4.5 bez zakłócenia, rys. 4.6 z zakłóceniem) w układzie rzeczywistym podczas jazdy po prostej prędkość  $\beta$  zawsze istnieje, dlatego też postanowioną ją również estymować.

Na powyższych charakterystykach zauważyć można, iż dla przypadku drugiego układ został zakłócony dodatkową masą w 3 sekundzie ruchu

Z uzyskanych danych wywnioskować można, że prędkości kątowe  $\alpha$  i  $\beta$  zostały odwzorowane poprawnie, zaś błąd pomiędzy wartością rzeczywistą a uzyskaną z symulacji jest bardzo mały rzędu  $\pm 0.025$  rad/s (maksymalna wartość szczytowa) dla prędkości  $\alpha$ , a dla  $\beta = \pm 0.0014$  rad/s.

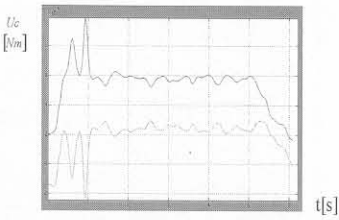
Dla przypadku z zakłóceniem dodatkowym otrzymano podobne wyniki i tak:  $\alpha = \pm 0.030$  rad/sek, a  $\beta = \pm 0.0007$  rad/sek.

Charakterystyki powyższe pokazują również porównanie do układu z zastosowanymi sieciami neuronowymi [8], jak wynika układ ten zachowuje się nieco inaczej, niż gdy zastosowaliśmy algorytm rozmyty. Błąd, jaki powstał jest prawie o połowę niższy (dla prędkości kątowej kół napędowych  $\alpha$ ) niż dla analogicznego układu z sieciami neuronowymi, natomiast dla prędkości kątowej ramy  $\beta$  różnica jest niewielka, co wynika z faktu, iż prędkość ta ma niewielką wartość. Wybór pomiędzy sieciami neuronowymi a algorytmami rozmytymi jest trudnym zagadnieniem, ponieważ obydwa te rozwiązania mają szereg zalet jak i wad, co w przypadku, gdy mamy do czynienia z układami silnie nieliniowymi jest bardzo widoczne. W szczególności poziom skomplikowania układu z sieciami neuronowymi jest znacznie większy (wybór optymalnej ilości neuronów) w porównaniu z zastosowaniem algorytmów rozmytych (zastosowanie *fuzzy logic toolbox*). Na korzyść algorytmów rozmytych przemawia czas samej symulacji (już po wyborze optymalnej ilości neuronów), układy te pracują szybciej niż z zastosowaniem algorytmów rozmytych.

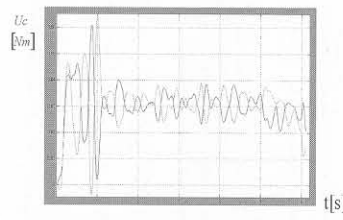
Rysunki pokazane poniżej przedstawiają kolejno sygnały tym razem uzyskane z członu kompensacyjnego -  $U_c$  (rys. 4.10 bez zakłócenia, rys. 4.12 z zakłóceniem) zbudowanego z wykorzystaniem algorytmów rozmytych, oraz sygnały wymuszające -  $U$  (rys. 4.11 bez zakłócenia, rys. 4.13 z zakłóceniem).

Sygnały wymuszenia są w tym wypadku momentami napędowymi  $M_1, M_2$ , dzięki analizie zadania odwrotnego można dość dokładnie określić momenty napędowe, jakie powodują ruch minirobota. Uzyskane w ten sposób wyniki można wykorzystać

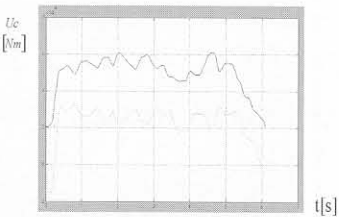




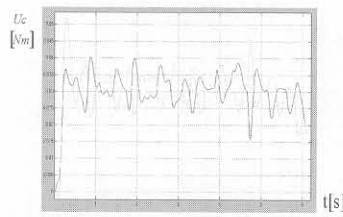
Rys. 4.10. Sygnały uzyskane z bloku kompensacyjnego.



Rys. 4.11. Błąd odwzorowania prędkości kątowej  $\beta$  powiększ.



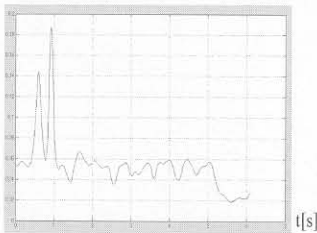
Rys. 4.12. Błąd odwzorowania prędkości kątowej  $\beta$ .



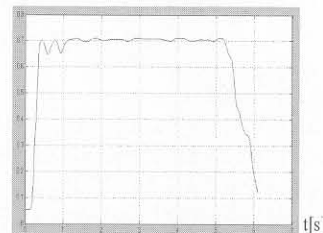
Rys. 4.13. Błąd odwzorowania prędkości kątowej  $\beta$  powiększ.

w dalszych pracach nad sterowaniem minirobota. Momenty wygenerowane dla przypadku bez zakłócenia dodatkowego są dość zniekształcone. Spowodowane jest to tym, że nastąpił poślizg podczas rozpędzania się minirobota, natomiast w kolejnej fazie jazdy minirobota ruch przebiegał bez większych zakłóceń. Gdy pojawiają się zakłócenia dodatkowe (dołożona dodatkowa masa w 3 sek. ruchu) poślizg kół nie jest już tak widoczny, ale ujawnił się wpływ zakłócenia. Sygnały uzyskane z bloku kompensacyjnego pokazują wartości aproksymowanej nieliniowej funkcji  $f(x)$ , wywnioskować można tutaj również podobne wnioski jak dla sygnału wymuszającego (poślizg oraz dołożenie dodatkowej masy powodującej zakłócenie ruchu minirobota)

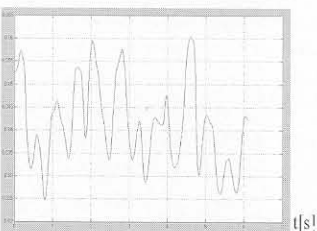
Poniżej pokazano wartości wag uczenia algorytmu rozmytego



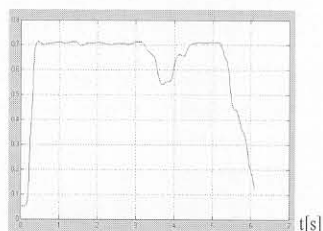
Rys. 4.14. Błąd odwzorowania prędkości kątowej  $\beta$ .



Rys. 4.15. Błąd odwzorowania prędkości kątowej  $\beta$  powiększ.



Rys. 4.16. Błąd odwzorowania prędkości kątowej  $\beta$ .



Rys. 4.17. Błąd odwzorowania prędkości kątowej  $\beta$  powiększ.

Z powyższych charakterystyk przebiegów uczenia układu rozmytego wynika, że algorytm zastosowany spełnił oczekiwania

## Podsumowanie

W pracy pokazano pewną grupę zagadnień związanych ze sterowaniem mobilnych robotów kołowych.

Przeprowadzone doświadczenia pokazują działanie i sposób projektowania oraz modelowania algorytmów rozmytych jak

również pokazują porównanie do innej metody sztucznej inteligencji, jaką są sieci neuronowe. Wyniki opublikowane w artykule wydanym w [8]. W części opisowej przedstawiono podstawy teoretyczne zagadnienia, jak również pokazano sposób zamodelowania algorytmów w pakiecie MATLAB™ (*fuzzy logic toolbox*).

Wyniki, jakie uzyskano w procesie weryfikacji numerycznej dowodzą, iż zastosowany algorytm uczenia spełnił postawione założenia ograniczając wartość błędów nadążania, jak również znacznie skróciły proces symulacji w stosunku do metod analitycznych. Porównanie, jakie pokazano powyżej dowodzi, iż algorytmy rozmyte, jakie zastosowano do weryfikacji MRM dość znacznie poprawiają własności układu jak również wpływają na wartości błędów nadążania w porównaniu do układu zbudowanego z wykorzystaniem sieci neuronowej.

Zastosowanie algorytmów rozmytych w sterowaniu robotami mobilnymi w dużym stopniu eliminuje problem z nieliniowościami występującymi w tego typu układach, co znacznie upraszcza sposób ich późniejszej weryfikacji. Przeprowadzone symulacje z wykorzystaniem minirobota mobilnego własnej konstrukcji pokazały jak wielkie różnice występują pomiędzy układami rzeczywistymi a modelami matematycznymi. Kolejnym etapem badań nad sterowaniem mobilnych minirobotów kołowych będzie realizacja sterowania on-line, dzięki któremu będzie możliwość sprawdzenia zastosowanych metod sztucznej inteligencji na obiekcie rzeczywistym MRM.

## Literatura

- [1] Giergiel J., Hendzel Z., Żylski W.: Kinematyka, dynamika i sterowanie mobilnych robotów kołowych w ujęciu algorytmicznym, Monografia Wydziału IMiR AGH, Kraków 2000 r.
- [2] Giergiel M., Hendzel Z., Żylski W.: Modelowanie i sterowanie mobilnych robotów kołowych, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2002 r.
- [3] Giergiel J., Żylski W.: Kinematyka i dynamika 2-kołowego mobilnego robota, Materiały XVI Ogólnopolskiej Konferencji Naukowo - Dydaktycznej Teorii Maszyn i Mechanizmów, Rzeszów 1998, 441 - 448.
- [4] Małka P., Klepka A.: Neuronowy obserwator stanu mobilnego robota kołowego, Materiały XI Międzynarodowego Sympozjum Dynamiki Konstrukcji, Rzeszów-Arłamów 2002, 415-422.
- [5] Hendzel Z., Jagielowicz C.: Odporne sterowanie ruchem mobilnego robota kołowego Materiały XI Międzynarodowego Sympozjum Dynamiki Konstrukcji, Rzeszów-Arłamów 2002, 249-256.
- [6] Kaczorek T.: Teoria sterowania i systemów, PWN, Warszawa 1999 r.
- [7] Mrozek, Z. Mrozek: Matlab, uniwersalne środowisko do obliczeń naukowo-technicznych, CCATIE, Kraków 1995 r.
- [8] Giergiel M., Małka P.: Sztuczne sieci neuronowe w sterowaniu minirobota kołowego, Pomiary Automatyka Kontrola, 05.2004, s. 20-24.
- [9] Piegat A.: Modelowanie i sterowanie rozmyte, Wydawnictwo EXIT, 1998.
- [10] Giergiel J., Hendzel Z., Żylski W.: Modelowanie z logiką rozmytą dynamiki mobilnych robotów kołowych, Materiały XVII Ogólnopolskiej Konferencji Naukowo-Dydaktycznej Teorii Maszyn i Mechanizmów, Warszawa-Jachranka, 2000.
- [11] Rutkowska D., Piliński M., Rutkowski L.: Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte, PWN, Warszawa 1999.
- [12] Buratowski T.: Modelowanie i identyfikacja mobilnych robotów kołowych, Praca Doktorska, 2003.
- [13] User Manual, Matlab™, 2000.

**Title:** Application of Fuzzy Logic Algorithms in Control of Mobile Mini Robot.

Artykuł recenzowany