

POLITECHNIKA POZNAŃSKA

WYDZIAŁ AUTOMATYKI, ROBOTYKI I ELEKTROTECHNIKI

INSTYTUT ROBOTYKI I INTELIGENCJI MASZYNOWEJ

ZAKŁAD STEROWANIA I ELEKTRONIKI PRZEMYSŁOWEJ



STEROWANIE ROZMYTE WAHADŁEM ODWRÓCONYM.

METODY INTELIGENCJI MASZYNOWEJ W
AUTOMATYCE

MATERIAŁY DO ZAJĘĆ LABORATORYJNYCH

MGR INŻ. KRZYSZTOF SIEMBAB,

MGR INŻ. ADRIAN WÓJCIK

ADRIAN.WOJCIK@PUT.POZNAN.PL

I. CEL ZAJĘĆ

WIEDZY

Celem zajęć jest zapoznanie z:

- strukturą układów regulacji wykorzystujących wnioskowanie rozmyte Sugeno,
- metodą sterowania ze pełnym sprzężeniem od wektora stanu (ang. *full state feedback*),
- metodą doboru wzmocnień sprzężenia od stanu za pomocą lokowania biegunów (ang. *pole placement*),

UMIEJĘTNOŚCI

Celem zajęć jest nabycie umiejętności w zakresie:

- analizy nieliniowych i niestacjonarnych obiektów dynamicznych,
- doboru wzmocnień sprzężenia od stanu na podstawie linearyzacji modelu,
- dopasowania przedziałów i parametrów funkcji przynależności wejść i wyjść regulatora rozmytego,
- budowy bazy reguł regulatora rozmytego na podstawie analizy parametrów modeli obiektu sterowania.

KOMPETENCJI SPOŁECZNYCH

Celem zajęć jest kształtowanie właściwych postaw w zakresie:

- prawidłowego zarządzania bazą kodu i danych,
- prawidłowej prezentacji i dokumentacji systemów logiki rozmytej.
- skutecznej komunikacji w kontekście metod inteligencji maszynowej.

II. POLECENIA KOŃCOWE

Wykonaj [zadania laboratoryjne](#) zgodnie z poleceniami i wskazówkami prowadzącego. Zaprezentuj rozwiązania prowadzącemu. Zrealizowane zadania są oceniane zero-jedynkowo.

W przypadku niezrealizowania wszystkich zadań w trakcie zajęć możliwe jest wykonanie raportu w celu uzupełnienia punktacji uzyskanej na zajęciach. Raport oceniany jest dodatkowo pod względem redakcyjnym. Wymogi redakcyjne oraz szablon raportu laboratoryjnego dostępne są w na portalu *eKursy* w katalogu „Wymogi raportu laboratoryjnego”. Raport należy przesłać jako rozwiązanie zadania na portalu *eKursy* w terminie do 7 dni od realizacji zajęć.

III. PRZYGOTOWANIE DO ZAJĘĆ

A) ZAPOZNANIE Z PRZEPISAMI BHP

Wszystkie informacje dotyczące instrukcji BHP laboratorium są zamieszczone w sali laboratoryjnej oraz na stronie Zakładu [1]. Wszystkie nieścisłości należy wyjaśnić z prowadzącym laboratorium. Wymagane jest zaznajomienie i zastosowanie do regulaminu.

Na zajęcia należy przyjść przygotowanym zgodnie z tematem zajęć. Obowiązuje również materiał ze wszystkich odbytych zajęć.

B) WPROWADZENIE DO STEROWANIA Z WNIOSKOWANIEM SUGENO

Wnioskowanie Sugeno (lub *Takagi-Sugeno-Kang*, TSK) jest typem wnioskowania rozmytego, które różni się od wnioskowania Mamdani'ego charakterem wyjścia. Układ TSK posiada tzw. wyjście funkcyjne tj. sygnały wyjściowe wyznaczone są jako wartości funkcji (zwykle liniowych), których wejściami są sygnały wejściowe samego układu rozmytego. Celem bazy reguł jest wybór **która** funkcja wyjściowa (o jakich parametrach) ma być aktywna dla aktualnych sygnałów wejściowych. Baza reguł ma charakter rozmyty tylko w części przestankowej (część „jeżeli”/„if” reguły), natomiast w części konkluzyjnej (część „to”/„then” reguły) występują zależności funkcyjne:

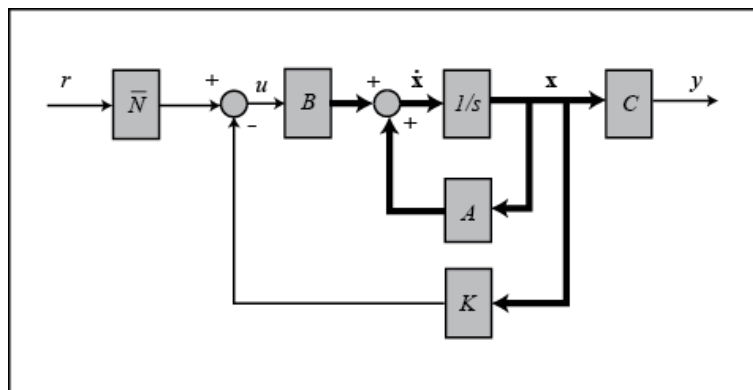
IF x_1 **IS** MF_1^1 **AND** ... **AND** x_N **IS** MF_1^N **THEN** $y = f_k(x_1, \dots, x_N)$

gdzie f_k to jedna z wielu wyjściowych zależności funkcyjnych.

Algorytmy sterowania oparte o wnioskowanie TSK mogą być z łatwością zaaplikowane w sytuacji gdy obiekt sterowania może być skutecznie sterowany przy użyciu regulatora liniowego ale nastawy tego regulatora zmieniają się zależnie od punktu pracy (obiekt nieliniowy) lub parametry obiektu są zmienne w czasie (obiekt niestacjonarny).

C) STEROWANIE MODALNE

Sterowanie modalne lub **lokowanie biegunów** (ang. *full state feedback*, FSF lub *pole placement*) to metoda sterowania, w której sygnał sterujący u stanowi liniową transformację wektora stanu x , tj. $u = -K \cdot x$ gdzie K to macierz wzmocnień sprzężenia zwrotnego (*wektor wzmocnień* dla układu o jednym wejściu). Na rys. 1. przedstawiono schemat blokowy modelu w postaci równań stanu w układzie sterowania modalnego. Do wyznaczenia wzmocnienia K stosuje się lokowanie biegunów, tj. dobiera się wzmocnienia tak, by bieguny **układu zamkniętego** przyjęły odgórnie założone wartości referencyjne. W tym celu należy rozwiązać równanie charakterystyczne $\det[sI - (A - BK)] = 0$ dla wzmocnienia K . Aby wyznaczenie wzmocnienia było możliwe to układ musi być sterowalny. Praktyczna realizacja sterowania modalnego wymaga dostępu do wszystkich zmiennych stanu układu. Sterowanie modalne jest więc często realizowane z wykorzystaniem obserwatorów wektora stanu.



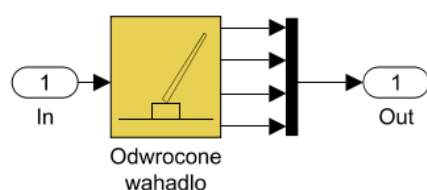
Rys. 1. Schemat blokowy sterowania modalnego dla modelu w postaci równań stanu [2].

Prawidłowo dobrane wzmocnienie K zapewnia zamkniętemu układowi regulacji zadaną *dynamikę*. W celu uzyskania zamkniętego układu regulacji o *jednostkowym wzmocnieniu* niezbędne jest wyznaczenie również parametru skalującego \tilde{N} dla wartości referencyjnej.

D) MODEL SYMULACYJNY WAHADŁA ODWRÓCONEGO

Tematem ćwiczenia jest budowa rozmytego regulatora typu TSK dla **wahadła odwróconego** zamontowanego na wózku. Wahadło porusza się w sposób swobodny, wózek natomiast wyposażony jest w napęd umożliwiający przyłożenie siły w osi poziomej (prawo/lewo).

Rozważany obiekt sterowania został zamodelowany w pliku **wahadlo.slx** jako nieliniowy układ o jednym wejściu (siła przyłożona do wózka) oraz czterech wyjściach (kompletny wektor stanu w postaci położenia i prędkości kątowej wahadła oraz położenia i prędkości liniowych wózka). Na rys. 2. przedstawiono schemat modelu symulacyjnego przeznaczonego do *linearyzacji* wraz z instrukcją dotyczącą wykorzystania modelu w procesie lokowania biegunów układu zamkniętego.

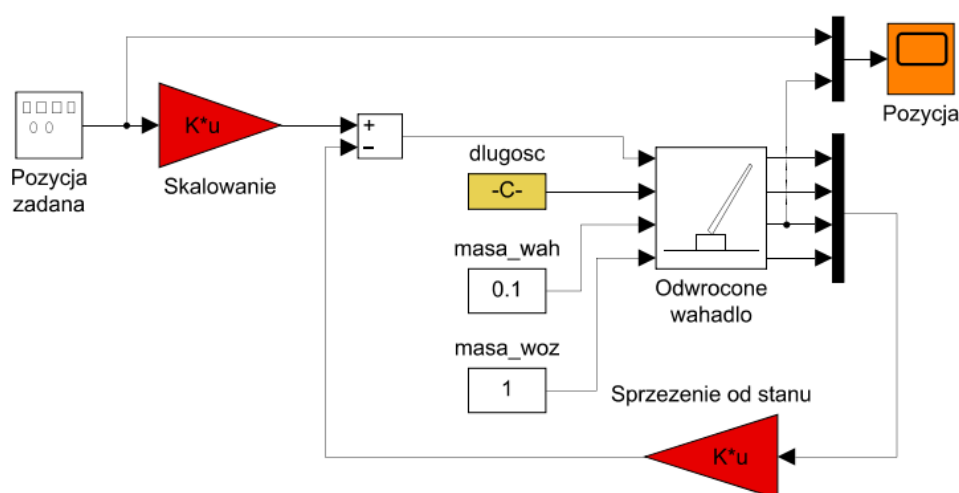


Procedura doboru sprzężenia zwrotnego:

1. Określenie modelu zlinearyzowanego:
 $[A,B,C,D]=linmod('wahadlo');$
2. Określenie stabilności układu otwartego poprzez analizę rozkładu biegunów:
 $bieg_otwarty=eig(A);$
3. Wybór biegunów układu zamkniętego:
 $bieg_zad=[-2, -2, -1+i, -1-i];$
4. Obliczenie współczynników proporcjonalnego sprzężenia zwrotnego
 $K=place(A,B,bieg_zad);$
5. Sprawdzenie rozkładu biegunów układu zamkniętego
 $bieg_zamk=eig(A-B*K)$

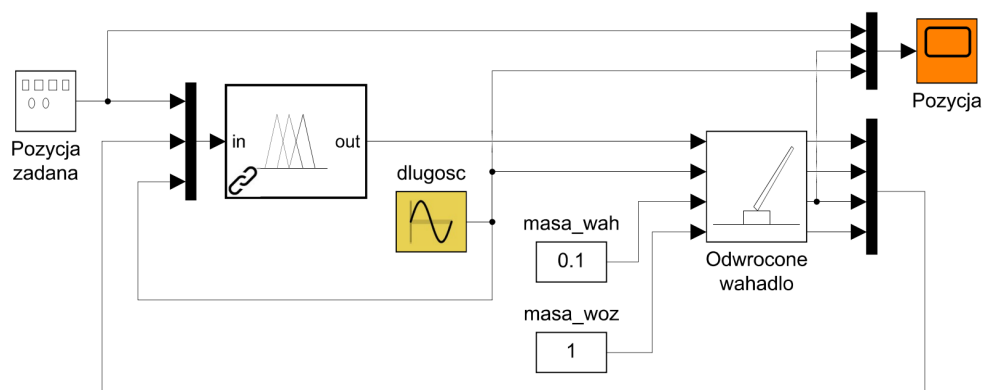
Rys. 2. Model symulacyjny wahadła odwróconego - plik **wahadlo.slx**.

Model symulacyjny **wahadlo_stabil.slx** zaprezentowany na rys. 3, stanowi implementację sterowania modalnego dla rozważanego wahadła. Wejściem układu regulacji jest *referencyjne położenie liniowe* wózka. Referencyjne położenie kątowe wahadła jest stałe i równe 0 rad (zadanie stabilizacji). Układ regulacji będzie działał prawidłowo (zgodnie z założoną dynamiką) o ile wzmacnienie K i współczynnik skalujący \tilde{N} dobrane zostały dla bieżącego zestawu parametrów oraz punktu pracy.

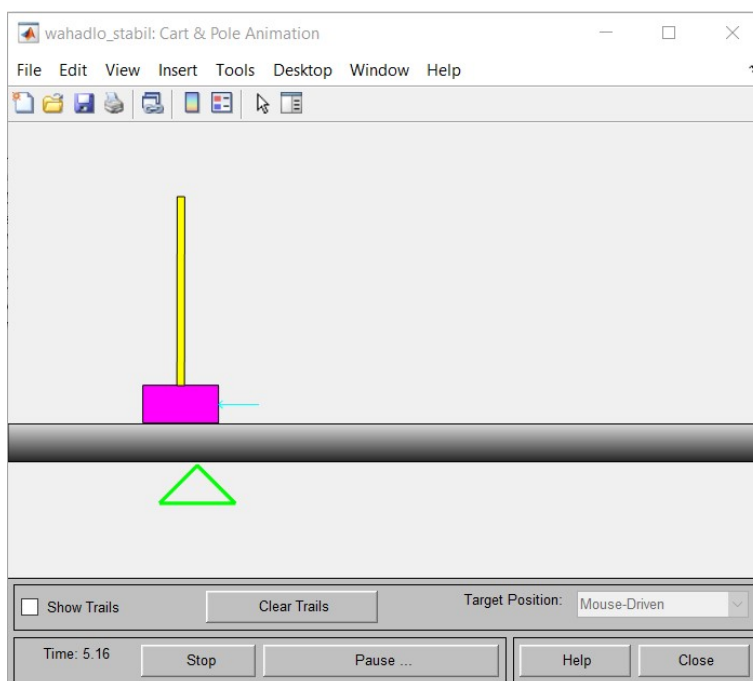


Rys. 3. Model symulacyjny liniowego zamkniętego układu regulacji wahadła odwróconego - plik **wahadlo_stabil.slx**.

Model symulacyjny `wahadlo_fuzzy.slx` zaprezentowany na rys. 4, stanowi implementację sterowania rozmytego, w którym wzmocnienie sprzężenia od stanu dobierane jest na bieżąco na podstawie pomiaru długości wahadła. Na rys. 5. przedstawiono wizualizację dołączoną do modeli układów zamkniętych.



Rys. 4. Model symulacyjny rozmytego zamkniętego układu regulacji wahadła odwróconego - plik `wahadlo_fuzzy.slx`.



Rys. 5. Wizualizacja wahadła odwróconego na wózku.

IV. SCENARIUSZ DO ZAJĘĆ

A) ŚRODKI DYDAKTYCZNE

- Sprzętowe: • komputer,
Programowe: • MATLAB (Fuzzy Logic Toolbox),
 • model symulacyjny wahadła odwróconego.

B) ZADANIA DO REALIZACJI

1. Dokonaj linearyzacji modelu wahadła odwróconego. Dobierz wzmocnienia sprzężenia od stanu dla różnych długości wahadła.
 - (a) Wykorzystaj model symulacyjny `wahadlo.slx` do uzyskania liniowych modeli w postaci równań stanu dla zadanych przez prowadzącego punktów pracy i zestawu parametrów (np. min. 10 różnych długości wahadła w przedziale $0.1\text{ m} < L < 8\text{ m}$, masa wahadła $m_p = 0.1\text{ kg}$, masa wózka $m_c = 10\text{ kg}$, przyspieszenie ziemskie $g = 9.8\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ oraz zerowe warunki początkowe). Wykorzystaj funkcję `linmod` [3].
 - (b) Wykorzystaj funkcje `place` [4] do wyznaczenia wzmocnień sprzężenia od stanu K oraz funkcji `rscale` [5] do uzyskania współczynników skalujących wartości zadanej \bar{N} dla **pozycji wózka**. Przyjmij jako referencyjne bieguny układu zamkniętego $[-2, -2, -1 + i, -1 - i]$.
 - (c) Przedstaw na wykresach zależność między długością wahadła a częścią rzeczywistą biegunów modelu liniowego oraz zależność między długością wahadła a wartościami wzmocnień sprzężenia od stanu K .
2. Sprawdź odpowiedź liniowego układu regulacji dla wyznaczonych wzmocnień sprzężenia od stanu.
 - (a) Wykorzystaj model symulacyjny `wahadlo_stabil.slx` do sprawdzenia zachowania układu.
 - (b) Przeprowadź symulacje dla przyjętych długości wahadła wykorzystując odpowiednie wyznaczone wzmocnienia sprzężenia zwrotnego i współczynniki skalujące.
 - (c) Przedstaw na wykresie przebiegi pozycji wózka oraz wartość referencyjną dla min. 10 rozważanych długości wahadła. Jako sygnał referencyjny przyjmij symetryczny sygnał prostokątny o wypełnieniu 50%, amplitudzie 1 m i częstotliwości 0.01 Hz .
3. Zbuduj regulator rozmyty do sterowania położeniem liniowym wahadła odwróconego.
 - (a) Stwórz regulator rozmyty z wnioskowaniem Sugeno. Regulator powinien mieć sześć wejść: referencyjne położenie liniowe, zmienne stanu (położenie kątowe, prędkość kątowa, położenie liniowe, prędkość liniowa) oraz zmienny parametr (długość wahadła).
 - (b) Tylko ostatnie wejście (zmienny parametr) musi mieć określone funkcje przynależności. Na podstawie wyników zadania 1. zaproponuj funkcje przynależności długości wahadła.
 - (c) Funkcje wyjściowe powinny być określone w postaci:
 $[\bar{N}(L), -K_1(L), -K_2(L), -K_3(L), -K_4(L), 0, 0]$
gdzie wartości współczynnika skalującego \bar{N} i wzmocnień K są wynikami z zadania 1.
 - (d) Zaproponuj bazę reguł określającą jakie wzmocnienia mają zostać zastosowane dla danej długości wahadła.
 - (e) Przedstaw na wykresie przebiegi pozycji wózka oraz wartość referencyjną przy harmonicznym zmiennej długości wahadła między 0.1 a 8 m (z częstotliwością $1\frac{\text{rad}}{\text{s}}$). Jako sygnał referencyjny przyjmij symetryczny sygnał prostokątny o wypełnieniu 50%, amplitudzie 1 m i częstotliwości 0.1 Hz .

BIBLIOGRAFIA

1. *Regulaminy porządkowe, instrukcje BHP* [online]. [B.d.] [udostępniono 2019-09-30]. Dostępne z: <http://zsep.cie.put.poznan.pl/materialy-dydaktyczne/MD/Regulaminy-porz%C4%85dkowe-instrukcje-BHP/>.
2. *Control Tutorials for MATLAB and Simulink - Introduction: State-Space Methods for Controller Design* [online] [udostępniono 2022-04-02]. Dostępne z: <https://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=Introduction§ion=ControlStateSpace>.
3. *Extract continuous-time linear state-space model around operating point - MATLAB linmod* [online] [udostępniono 2022-04-02]. Dostępne z: <https://www.mathworks.com/help/simulink/slref/linmod.html>.
4. *Pole placement design - MATLAB place* [online] [udostępniono 2022-04-02]. Dostępne z: <https://www.mathworks.com/help/control/ref/place.html>.
5. *Control Tutorials for MATLAB and Simulink - Function rscale: Finding the Scale Factor to Eliminate Steady-State Error* [online] [udostępniono 2022-04-02]. Dostępne z: https://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?aux=Extras_rscale.