

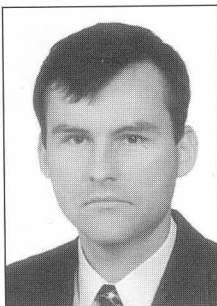
Krzysztof WIKTOROWICZ, Roman ZAJDEL
POLITECHNIKA RZESZOWSKA, KATEDRA INFORMATYKI I AUTOMATYKI

O doborze reguł sterowania dla regulatora rozmytego

Dr inż. Krzysztof WIKTOROWICZ

Dyplom magistra inżyniera uzyskał w 1993 roku na Wydziale Elektrycznym Politechniki Rzeszowskiej. Bezsrednio po studiach rozpoczął pracę w Katedrze Informatyki i Automatyki Politechniki Rzeszowskiej. Stopień doktora nauk technicznych uzyskał w 2001 roku w Instytucie Cybernetyki Technicznej Politechniki Wrocławskiej. Zajmuje się teorią sterowania, a w szczególności układami regulacji rozmytej.

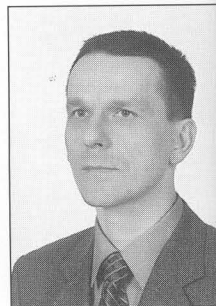
e-mail: kwiktor@prz-rzeszow.pl



Dr inż. Roman ZAJDEL

Studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Rzeszowskiej ukończył w 1990 roku. W 1999 roku uzyskał tytuł doktora nauk technicznych na Politechnice Wrocławskiej. Pracuje na Politechnice Rzeszowskiej na stanowisku adiunkta. Główny kierunek badań naukowych to sieci neuronowe, systemy rozmyte oraz rozmyte sieci neuronowe ze szczególnym uwzględnieniem uczenia ze wzmocnieniem.

e-mail: rzajdel@prz-rzeszow.pl



Streszczenie

W pracy scharakteryzowano problem doboru reguł sterowania dla regulatora rozmytego. Omówiono metody pozyskiwania reguł za pomocą sieci neuronowej uczonej metodą z nauczycielem i ze wzmocnieniem. Przedstawiono zagadnienie badania stabilności i jakości zaprojektowanego układu. Omawiane problemy zilustrowano przykładowymi wynikami badań.

Abstract

In the paper the problem of collecting of control rules for a fuzzy logic controller is characterised. Two methods of generating of rules using neural network are described: supervised learning and reinforcement learning. The problem of stability and quality analysis is presented. The considerations are illustrated by examples.

Słowa kluczowe: sterowanie rozmyte, sieć neuronowa, uczenie ze wzmocnieniem, stabilność, jakość.

Keywords: fuzzy control, neural network, reinforcement learning, stability, quality.

1. Wstęp

Idea regulatora rozmytego pochodzi od Mamdaniego [4]. Regulator ten może być traktowany jako prosty system ekspertowy, gdyż jego zasada działania opiera się na regułach lingwistycznych. Idea ta została rozwinięta przez wielu autorów i doczekała się sporej liczby praktycznych zastosowań, począwszy od urządzeń domowego użytku a skończywszy na sterowaniu złożonymi systemami. Zasadniczym problemem w automatyzacji takich systemów jest dobór reguł, według których będzie działał regulator. Zazwyczaj korzysta się z heurystycznej wiedzy, jaką posiadają doświadczeni operatorzy (eksperti). Inne metody są rzadziej stosowane i polegają na wyrowadzaniu reguł na podstawie rozmytego modelu obiektu [2] lub za pomocą uczenia [10]. Z zagadnieniem doboru reguł nierozłącznie wiąże się ważny problem dotyczący badania stabilności i jakości zaprojektowanego układu. Niestety, jak dotąd, brak jest ogólnych metod projektowania optymalnych układów z regulatorem rozmytym w sensie powszechnie akceptowalnych kryteriów.

2. Generowanie reguł przez sieć neuronową

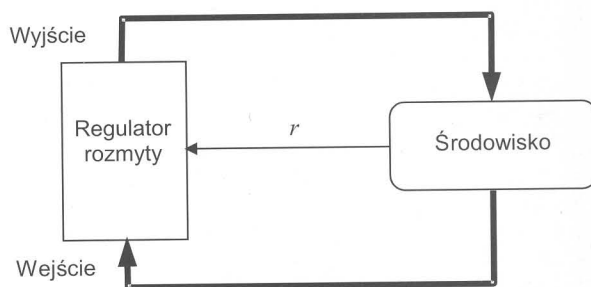
Należy zauważyć, że w większości aplikacji, w których korzysta się z wiedzy eksperta, liczba reguł jest niewielka. Stąd pojawiają się projekty łączenia logiki rozmytej z sieciami neuronowymi, co powinno pozwolić na znaczne uproszczenie procesu strojenia regulatora rozmytego.

Zastosowanie technologii sieci neuronowej może polegać na użyciu algorytmów uczenia (z nauczycielem i ze wzmocnieniem) do strojenia regulatorów rozmytych reprezentowanych w postaci sieci neuronowej. Przykładem jest regulator Takagi-Sugeno, którego reprezentacja „neuronowa” jest powszechnie znana [6].

Traktując regulator rozmyty jako sieć neuronową, a następnie stosując algorytm uczenia z nauczycielem, można przedstawić re-

gulatorowi wiedzę eksperta pozyskaną poprzez obserwację jego zachowania podczas sterowania obiektem. Rozwiązanie takie znalazło zastosowanie w systemie MATLAB pod postacią funkcji ANFIS [7]. Jego zaletą jest to, że można dobrać dowolną liczbę reguł bez angażowania człowieka. Niewątpliwą wadą takiego rozwiązania jest charakter zgromadzonej wiedzy. Sieć taka może co najwyżej (przy skończonym, niezerowym błędzie uczenia) odtwarzać zachowanie eksperta. Istnieje co prawda możliwość osiągnięcia lepszych wyników sterowania, ale może się to przytrafić jedynie w przypadku uczenia z błędem, przy czym błąd ten będzie działał na korzyść procesu sterowania [8].

W metodzie uczenia z nauczycielem zakłada się istnienie pożądanego wartości wyjściowych dla każdego wzorca wejściowego. Nie zawsze tak szczegółowe informacje są łatwo dostępne. W skrajnych przypadkach dostępna jest tylko informacja dwustanowa, która mówi, czy wyjście jest „dobre”, czy też „złe”. Uczenie wykorzystujące tę ubogą informację (tzw. sygnał wzmocnienia) jest nazywane uczeniem ze wzmocnieniem lub uczeniem z krytykiem.



Rys. 1. Idea uczenia ze wzmocnieniem regulatora rozmytego
Fig. 1. The idea of learning of a fuzzy logic controller

W metodzie uczenia ze wzmocnieniem przyjmuje się, że sieć działa w pewnym środowisku. Środowisko to dostarcza sygnałów wejściowych dla sieci, odbiera sygnały wyjściowe i na tej podstawie wytwarza sygnał wzmocnienia r (rys. 1). Sygnał wzmocnienia jest podstawą algorytmu uczenia. Najczęściej ma on postać [10]:

1. zbioru dwuelementowego $r(t) \in \{-1, 1\}$, gdzie 1 oznacza „sukces”, a -1 „porażkę”,
2. skończonego zbioru liczb z przedziału $[-1, 1]$, np. $r(t) \in \{-1, -0.5, 0, 0.5, 1\}$, który odpowiada dyskretnym poziomom osiąganym „porażki” lub „sukcesu”,
3. symetrycznego zbioru $r(t) \in [-1, 1]$, który w sposób „ciągły” oddaje różne poziomy „porażki” lub „sukcesu”,
4. niesymetrycznego zbioru $r(t) \in [-1, 0]$, który głównie reprezentuje różne poziomy „porażki”, natomiast tylko 0 odpowiada „sukcesowi”.

Uczenie ze wzmocnieniem jest jedną z postaci uczenia pod nadzorem, ponieważ sieć otrzymuje sygnał zwrotny ze środowiska,

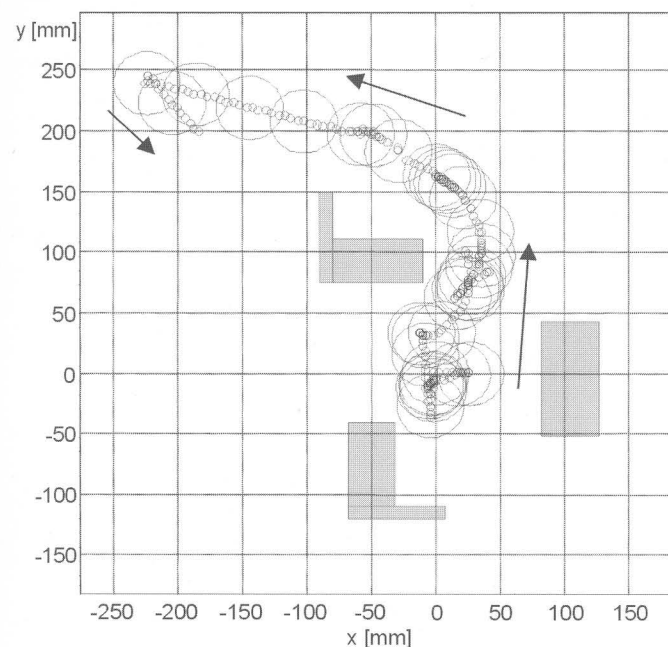
na które oddziałuje. Jest przy tym bardziej uniwersalne w zastosowaniu, gdyż nie wymaga znajomości sygnałów pożądaných na wyjściu systemu. Algorytm wymaga jedynie informacji oceniającej, czy kierunek zmiany wag (a co za tym idzie - podjęta przez sieć akcja) prowadzi do maksymalizacji wartości sygnału wzmocnienia w długim horyzoncie czasowym.

Sam proces uczenia, przebiegający on-line, odbywa się bez udziału człowieka. W trakcie sterowania procesem, system rozmyty nabywa wiedzę osiągając sukcesy i popełniając błędy. Sytuacje, gdy regulator osiąga sukces w sterowaniu tzn. polepsza pewny wskaźnik jakości, są wzmacniane, zaś sytuacje przyczyniające się do pogorszenia jakości sterowania zostają zaliczone do porażki, a algorytm tak modyfikuje reguły, aby unikać ich w przyszłości.

Pośród wielu algorytmów uczenia ze wzmocnieniem do eksperymentów przyjęto algorytm elementów neuropodobnych ASE (associative search element) / ACE (adaptive critic element) [1]. W miejsce elementów neuronowych zastosowano regulatory rozmyte Takagi-Sugeno. Jeden z nich (ASE) pełni funkcję regulatora, zaś drugi (ACE) służy do wyznaczenia wewnętrznego sygnału wzmocnionego używanego do uczenia regulatora ASE.

W pracach [9], [10] rozważono jako przykład problem sterowania robotem mobilnym za pomocą regulatora rozmytego, którego reguły pozyskano w procesie uczenia ze wzmocnieniem. Celem uczenia był dobór kilkunastu reguł pozwalających na takie sterowanie robotem, aby ten omijał przeszkody. Na początku eksperymentu regulator nie posiadał żadnej, nawet przybliżonej wiedzy na temat sterowania robotem.

Do realizacji tego zadania zaproponowano sygnał wzmocnienia $r = f(s_1, \dots, s_8)$, gdzie f jest funkcją sygnałów z czujników zbliżeniowych s_i . Wartość tak określonego sygnału wzmocnienia zawiera się w przedziale $[-1, 0]$, przy czym wyłącznie 0 oznacza brak kontaktu z przeszkodą (sukces) i taka sytuacja jest nagradzana w procesie uczenia. Wartości ujemne tego sygnału oznaczają zbliżanie się do przeszkody i taka sytuacja jest karana.



Rys. 2. Trajektoria robota w trakcie uczenia regulatora rozmytego
Fig. 2. Trajectory of a robot during learning of a fuzzy logic controller

Uczenie reguł odbywało się w trakcie poruszania się robota w otoczeniu nieruchomych przeszkód. Przykładową trajektorię robota przedstawiono na rys. 2. Widać, że już w fazie uczenia robot nie zderza się z przeszkodami, co może świadczyć o trafności przyjętych rozwiązań.

W przypadku reguł otrzymanych w wyniku uczenia nasuwa się pytanie *Na ile otrzymane reguły są wiarygodne?* Chodzi tutaj o zbadanie, czy zestaw danych uczących (sytuacji zaistniałych w procesie uczenia) zapewnił wszechstronne i równomierne nau-

czenie wszystkich reguł. Ten problem po części rozwiązuje zaproponowany w pracy [9] wskaźnik będący miarą uczestnictwa reguł w procesie uczenia. Informacja o tym, które reguły nie były uczone w wystarczającym stopniu może posłużyć do takiej zmiany warunków uczenia (np. liczby i rozmieszczenia przeszkód w otoczeniu robota), aby doprowadzić do ich bardziej równomiernego nauczenia.

3. Ocena stabilności i jakości

Omawiając metody doboru reguł nie rozważaliśmy do tej pory dwóch bardzo ważnych zagadnień: stabilności i jakości zaprojektowanego układu. W klasycznych układach regulacji zapewnienie stabilności jest problemem podstawowym. W układach liniowych odpowiedź na pytanie *Czy zaprojektowany układ jest stabilny?* jest stosunkowo prosta. Wystarczy zbadać położenie biegunów układu zamkniętego i o ile znajdują się one w lewej półpłaszczyźnie zmiennej zespolonej s , to układ będzie stabilny. W układach nieliniowych kryteria stabilności nie są już tak proste. Do najczęściej stosowanych należą metody: Lapunowa, płaszczyzny fazowej, funkcji opisującej lub Popova. Metody Lapunowa, pośrednia i bezpośrednia, są metodami analitycznymi. Metoda pośrednia pozwala badać stabilność układu nieliniowego poprzez badanie jego przybliżenia liniowego w małym otoczeniu punktu równowagi. Metoda bezpośrednia jest metodą ogólną, niestety jej wadą jest trudność znalezienia tzw. funkcji Lapunowa. Metoda płaszczyzny fazowej jest metodą graficzną a jej zastosowanie jest ograniczone do układów drugiego rzędu. Z kolei metoda funkcji opisującej nie jest ograniczona przez rząd układu, lecz jest metodą przybliżoną. W układach, w których można wyróżnić liniowy człon dynamiczny i element nieliniowy bez dynamiki można zastosować metodę Popova. Niestety podaje ona tylko warunki wystarczające stabilności.

Jak widać badanie stabilności układu nieliniowego, w tym także układu z regulatorem rozmytym, nie jest proste. Tym bardziej, że w większości przypadków jest wymagana znajomość zachowania obiektu, czy to w postaci modelu jak w metodzie Lapunowa, czy w postaci charakterystyki częstotliwościowej jak w metodzie Popova. Tymczasem za zaletę regulacji rozmytej uznaje się fakt, że można nastawić regulator bez dokładnej znajomości obiektu. Niestety takie podejście uniemożliwia badanie stabilności. W konsekwencji albo przemilcza się ten problem, albo uznaje się, że jednak jakiś model istnieje. Model ten może być przybliżony (rozmyty) lub nie. W tym drugim przypadku problem stabilności sprowadza się do problemu stabilności pewnego układu nieliniowego.

W pracach [3], [5] badano klasę układów regulacji z regulatorem rozmytym będącym tzw. nieliniowością w sektorze i obiektem liniaryzowalnym wokół punktu pracy. Badanie tej klasy układów (nawet z obiektem liniowym) nie wydaje się proste. Po pierwsze, dlatego że nie istnieje jedyna, powszechnie akceptowalna metoda projektowania, a po drugie, że w ogólnym przypadku nie można podać analitycznego wzoru opisującego funkcję regulatora. Rozważa się tam wielowymiarowy układ regulacji rozmytej opisany równaniami

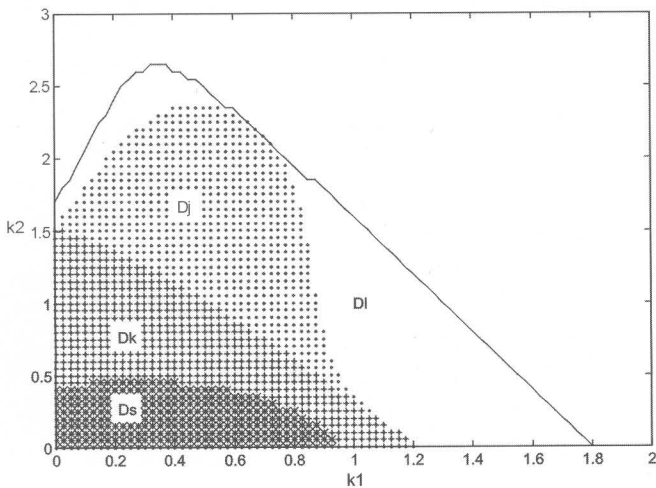
$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t), & \mathbf{x}(0) \\ \mathbf{u}(t) = \mathbf{f}[\mathbf{x}(t)] \\ \boldsymbol{\sigma}(t) = \mathbf{H}\mathbf{x}(t) \end{cases} \quad (1)$$

gdzie $\mathbf{x}(t)$ i $\mathbf{u}(t)$ są odpowiednio n -wymiarowym wektorem stanu i m -wymiarowym wektorem sterowania. Człon liniowy opisuje stacjonarne równanie stanu z macierzą stanu \mathbf{A} i macierzą sterowania \mathbf{B} . Człon nieliniowy, w naszym przypadku regulator rozmyty, opisuje funkcja $\mathbf{u}(t) = \mathbf{f}[\mathbf{x}(t)]$. W celu sformułowania warunku sektora wprowadza się sztuczną zmienną $\boldsymbol{\sigma}(t) = \mathbf{H}\mathbf{x}(t)$, której składowe zależą od właściwości funkcji regulatora wyrażonych elementami macierzy \mathbf{H} . Mamy wówczas warunek sektora

$$\beta_j \leq \frac{u_j(t)}{\sigma_j(t)} \leq \beta_j + k_j, \quad \forall \sigma_j \neq 0 \quad (2)$$

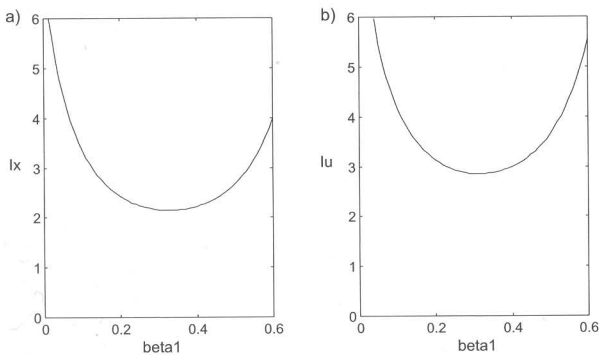
przy czym ($\sigma_j = 0$) \Rightarrow ($u_j = 0$). Warunek ten mówi, że funkcja u_j regulatora leży pomiędzy dwiema hiperpłaszczyznami - w najprostszym przypadku, tzn. dla regulatora z jednym wejściem, funkcja ta leży pomiędzy prostymi o nachyleniach β i $(\beta+k)$. Wyznaczenie ograniczeń sektora w sposób analityczny nie jest w ogólnym przypadku możliwe i dlatego stosuje się tutaj obliczenia numeryczne.

Warto zaznaczyć, że w rozważanej metodzie obiekt nie musi być opisany równaniem stanu. Do badania stabilności i jakości wystarczy znajomość jego charakterystyki częstotliwościowej.



Rys. 3. Obszary stabilności układu z regulatorem rozmytym
Fig. 3. Stability regions of a system with a fuzzy logic controller

Do badania stabilności użyto kryterium Kudrewicza, Jungera i twierdzenie o „małym wzmocnieniu”. Na rys. 3 przedstawiono obszary stabilności wyznaczone dla przykładowego układu z regulatorem rozmytym o trzech wejściach i dwóch wyjściach. Obszar D_1 to obszar stabilności układu z regulatorem liniowym (tzw. obszar spełnienia uogólnionego warunku Hurwitza), obszary D_k , D_s i D dotyczą układu z regulatorem rozmytym i uzyskano je odpowiednio z twierdzenia Jungera, Kudrewicza i o „małym wzmocnieniu”. Z wykresu można odczytać wartości ograniczeń sektorowych k_1 i k_2 , dla których będzie zagwarantowana stabilność.



Rys. 4. Górne oszacowania norm: a) I_x , b) I_u
Fig. 4. Upper bounds of the norms: a) I_x , b) I_u

Drugim ważnym zagadnieniem jest projektowanie układu regulacji z zapewnieniem zadanego wskaźnika jakości. Może nim być np. przeregulowanie, czas regulacji, wydatek energetyczny, itp. W literaturze dotyczącej regulacji rozmytej można znaleźć pewne wnioski dotyczące jakości sterowania rozmytego, lecz są one formułowane na podstawie badań symulacyjnych lub eksperymentalnych.

W pracy [5] podjęto próbę oceny regulatora rozmytego na drodze analitycznej. Dla omówionej powyżej klasy układów wyprobowano kryteria jakości w postaci górnych oszacowań I_x i I_u odpowiednio normy wektora stanu i wektora sterowania, tzn. $I_x \leq \|x\|^2$ i $I_u \leq \|u\|^2$. W tym celu wykorzystano dowody twierdzeń o stabilności zarówno dla układów z regulatorem rozmytym z jednym wejściem, jak i z wieloma wejściami. Dla przykładowego układu otrzymano zależności przedstawione na rys. 4. Widać, że oszacowania I_x i I_u zależą tutaj od dolnego ograniczenia sektora β_1 i przyjmują wartości minimalne. Możemy wobec tego mówić o otrzymaniu sektora optymalnego w sensie minimalizacji górnych oszacowań. Na podstawie otrzymanych oszacowań sformułowano procedurę projektowania regulatora rozmytego tak, aby spełniał to kryterium jakości.

4. Podsumowanie

Idea sterowania rozmytego odniosła niewątpliwie sukces i została dobrze przyjęta przez inżynierów-projektantów układów automatyki. Jednocześnie bywa mocno krytykowana za brak podstaw teoretycznych. Wobec powyższego jest konieczne opracowanie takich metod analizy i syntezy regulatora rozmytego, które byłyby z jednej strony akceptowane przez praktyków, a z drugiej dobrze podbudowane teoretycznie. W świetle przedstawionych wyników, interesujące wydaje się połączenie uczenia regulatora rozmytego z badaniem jego stabilności i jakości. Można by narzucić na proces uczenia takie ograniczenia, aby otrzymana funkcja regulatora gwarantowała stabilność i jednocześnie spełniała pewne kryterium jakości. W tym kierunku zmierzają badania prowadzone autorów w *Zespole sztucznej inteligencji i podstaw informatyki* w Katedrze Informatyki i Automatyki Politechniki Rzeszowskiej.

5. Literatura

- [1] A. G. Barto, R. S. Sutton, C. W. Anderson: Neuronlike adaptive elements that can solve difficult learning problem, IEEE Trans. SMC, 1983, 13, 834-847.
- [2] J. Kluska, K. Wiktorowicz: Automatic generating of fuzzy control rules for a fuzzy logic controller using Matlab, Systems Science, 1997, vol. 23, no. 1, 89-99.
- [3] J. Kluska, K. Wiktorowicz: Integral evaluations for a class of multivariable fuzzy control systems, 15th IFAC World Congress, Barcelona, Spain, 2002.
- [4] E. H. Mamdani, S. Assilian: An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller, International Journal of Man-Machine Studies, vol. 7, 1-13, 1975.
- [5] K. Wiktorowicz: Jakość regulacji rozmytej, Rozprawa doktorska, Politechnika Rzeszowska, 2001.
- [6] R. R. Yager, D. P. Filev, Podstawy modelowania i sterowania rozmytego, WNT, Warszawa 1995.
- [7] R. Zajdel, K. Świder: Using Neural and Neuro-Fuzzy Architectures for Character Recognition with MATLAB, Proc. 4. International Workshop, Fuzzy-Neuro-Systeme'97: Computational Intelligence, Germany, Soest 1997, 549-556.
- [8] R. Zajdel, K. Wiktorowicz, Synteza regulatora rozmytego i neuronowego dla obiektów nieliniowych, Konf. Nauk.-Tech.: „Zastosowania Komputerów w Elektrotechnice”, Poznań/Kiekrz 1996, 161-164.
- [9] R. Zajdel: Wiarygodność reguł rozmytych otrzymanych w procesie uczenia, PAK, 2003, 4, 28-30.
- [10] R. Zajdel: Algorytmy rozmyto-neuronowe i ich zastosowanie do sterowania małym robotem mobilnym, Rozprawa doktorska, Wrocław 1998.

Title: About collecting of control rules for a fuzzy logic controller