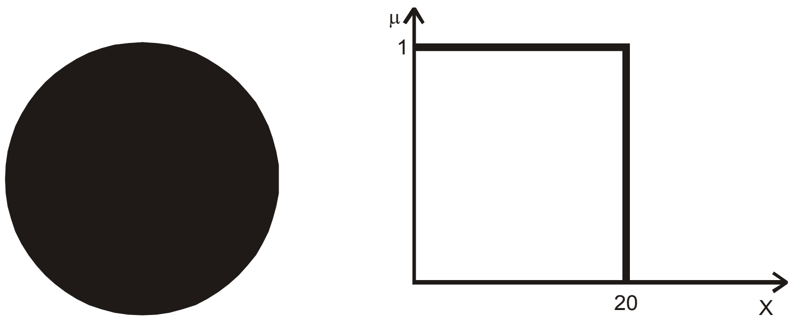
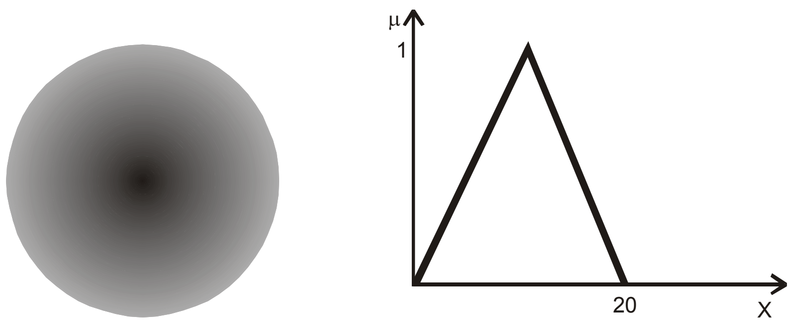
1 Podstawy logiki rozmytej i regulatorów rozmytych

1.1 Zbiór rozmyty

Pojęcie zbioru rozmytego zostało wprowadzone przez L. A. Zadeha w 1965. Celem wprowadzenia tego pojęcia była chęć modelowania procesów złożonych, w szczególności obejmujących udział czynnika ludzkiego. W logice klasycznej element może należeć do zbioru lub do niego nie należeć. Przynależność do zbioru jest więc zdefiniowana funkcją przyjmującą dwie wartości: 0 lub 1. W odróżnieniu od zbioru klasycznego funkcja przynależności zbioru rozmytego może przyjmować dowolne wartości ze zbioru <0, 1>. Taki sposób klasyfikacji jest bardziej zbliżony do ludzkiego procesu myślenia, który jest z natury mglisty. Wprowadzając pewną dozę niedokładności, zyskujemy odporność systemu, która umożliwia modelowanie złożonych procesów.



Rysunek 1-1. Przykładowy zbiór klasyczny (nierozmyty) oraz jego funkcja przynależności.



Rysunek 1-2. Przykładowy zbiór rozmyty wraz z funkcją przynależności.

Stosowanie zbiorów rozmytych w systemach sterownia pozwala na dokładniejsze odwzorowanie pojęć stosowanych przez ludzi, które często są subiektywne i nieprecyzyjne. Stopniowe przejście między przynależnością do zbioru a jej brakiem pozwala nam uniknąć ścisłej klasyfikacji elementów, która często jest niemożliwa. Logika rozmyta jest w rzeczywistości uogólnieniem logiki klasycznej, podobnie jak liczby zespolone są uogólnieniem liczb rzeczywistych. Także wiele operacji i definicji dotyczących zbiorów rozmytych to proste rozszerzenia definicji znanych z logiki klasycznej.

1.2 Podstawowe operacje na zbiorach rozmytych

W większości przypadków istnieje wiele możliwości uogólniania operacji na zbiorach klasycznych na zbiory rozmyte. W niniejszym podrozdziale skupimy się na wybranych operacjach, które są najczęściej stosowane w regulatorach o logice rozmytej.

1.2.1 Suma zbiorów

Niech zbiory A i B będą podzbiorami rozmytymi zbioru X. Ich *suma* jest podzbiorem rozmytym C zbioru X, takim że dla każdego $x \in X$:

$$C(x) = \mathrm{Max}[A(x), B(x)] = A(x) \vee B(x)$$

1.2.2 Iloczyn zbiorów

Niech zbiory A i B będą podzbiorami rozmytymi zbioru X. Ich *iloczyn* jest podzbiorem rozmytym C zbioru X, takim że dla każdego $x \in X$:

$$C(x) = \mathrm{Min}[A(x), B(x)] = A(x) \wedge B(x)$$

1.2.3 Dopełnienie zbioru

Niech zbiór A będzie podzbiorem rozmytym zbioru X. Dopełnienie zbioru A jest podzbiorem rozmytym B zbioru X, takim że dla każdego $x \in X$:

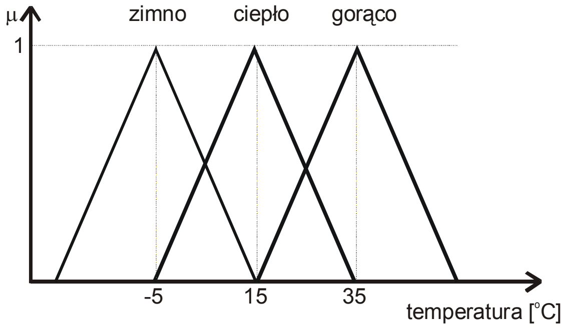
$$B(x) = 1 - A(x)$$

1.3 Wartości lingwistyczne

Zbiór rozmyty często używany jest do określenia znaczenia pojęcia stosowanego w języku naturalnym. Wyrazy używane do określania różnych wielkości często nie niosą ze sobą precyzyjnej informacji o wartości. Gdy mówimy na przykład, że jest *ciepło*, nie mamy na myśli konkretnej wartości, tylko pewien zakres temperatur. Taki sposób rozumowania pozwala nam na budowanie zdań typu:

X jest *ciepło*

gdzie X może oznaczać na przykład temperaturę powietrza
W ten sposób reprezentujemy swoją wiedzę o zjawisku, unikając podawania konkretnych wartości. W powyższym zdaniu *ciepło* jest przykładem zmiennej lingwistycznej. Taki sposób prezentacji umożliwia nam zastosowanie zbiorów rozmytych do przedstawienia wartości lingwistycznych.
Stosując wartości lingwistyczne, świadomie rezygnujemy z podawania dokładnych wartości. Określenie *ciepło* może oznaczać zarówno 20 stopni, jak i 30. Wiedza na temat temperatury przedstawiona w postaci wartości lingwistycznej nie daje nam pewności co do jej rzeczywistej wartości, ale wystarcza na przykład do tego, by się odpowiednio ubrać.

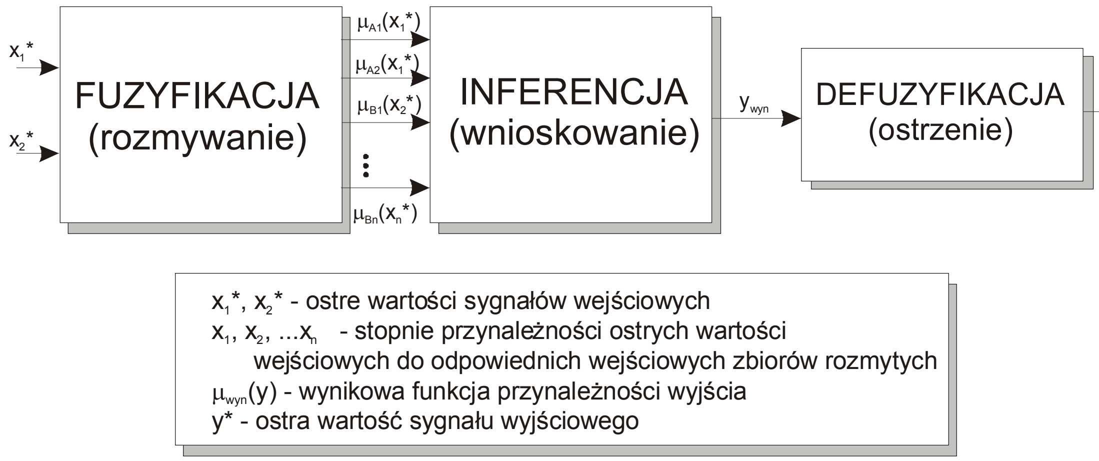


Rysunek 1-3. Wartości lingwistyczne i odpowiadające im zbiory rozmyte

Łatwo zauważyć, że do zbioru *ciepło* należy zarówno wartość 20 jak i 30 stopni. Różnica polega jedynie na różnym stopniu przynależności tych wartości do zbioru. Analogicznie wartość np. 25 stopni należy jednocześnie do zbioru *ciepło*, jak i *gorąco*. Jest to różnica w stosunku do logiki konwencjonalnej, w której granice zbiorów są zarysowane ostro, i jeżeli jakaś wartość jest duża to nie może być jednocześnie średnia.

1.4 Regulatory rozmyte

Jednym z typowych zastosowań praktycznych logiki rozmytej jest użycie jej przy projektowaniu regulatorów. Struktura typowego regulatora rozmytego o dwóch wejściach i jednym wyjściu przedstawiona jest na rysunku 2.4.



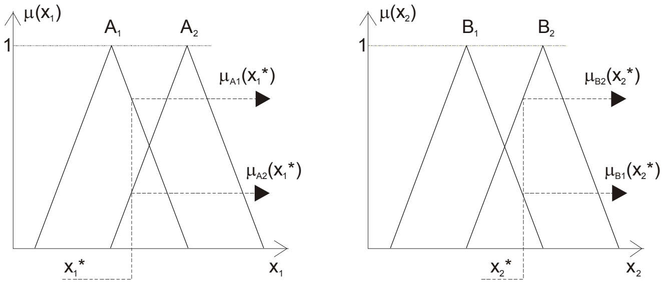
Rysunek 1-4. Struktura przykładowego regulatora rozmytego o 2 wejściach i jednym wyjściu.

Na wejścia regulatora rozmytego wprowadzone zostają ostre wartości x_1^*, x_2^*.

UWAGA: Od tego momentu gwiazdka przy symbolu wartości oznaczać będzie, iż mamy do czynienia z wartością ostrą – to znaczy rzeczywistą wartością sygnału przed fuzyfikacją lub po defuzyfikacji.

1.4.1 Fuzyfikacja

W bloku FUZYFIKACJA przeprowadzana jest operacja rozmywania czyli obliczania stopnia przynależności do poszczególnych zbiorów rozmytych A_i, B_j wejść. Aby operację tę przeprowadzić blok FUZYFIKACJA musi posiadać dokładnie zdefiniowane funkcje przynależności $\mu_{Ai}(x_1)$, $\mu_{Bj}(x_2)$ do zbiorów rozmytych poszczególnych wejść. Przykład przedstawiony jest na rysunku 2.5.



Rysunek 1-5. Przykładowe zbiory rozmyte dla sygnałów wejściowych x_1* i x_2* wraz z ilustracją obliczania stopnia przynależności $\mu_{Ai}(x_1^*)$ i $\mu_{Bj}(x_2^*)$ sygnałów do poszczególnych zbiorów.

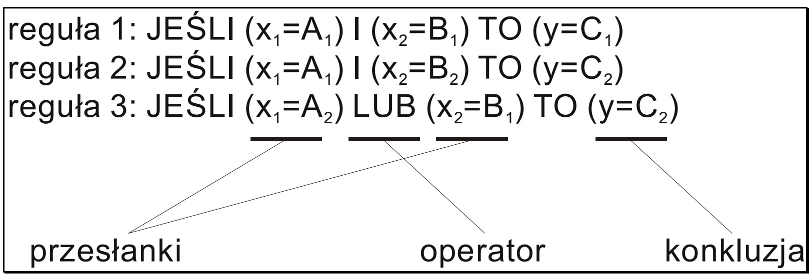
Obliczone i podane na wyjściu bloku FUZYFIKACJA wartości stopni przynależności $\mu_{Ai}(x_1^*)$, $\mu_{Bj}(x_2^*)$ informują o tym, jak wysoka jest przynależność ostrych wartości wejść x_1*, x_2* do poszczególnych zbiorów rozmytych wejść, tzn. na przykład jak bardzo wartości te są małe (A_1, B_1) lub duże (A_2, B_2).

1.4.2 Inferencja

Blok INFERENCJA oblicza na podstawie wejściowych stopni przynależności $\mu_{Ai}(x_1)$, $\mu_{Bj}(x_2)$ tzw. wynikową funkcję przynależności $\mu_{wyn}(y)$ wyjścia regulatora. Funkcja ta ma często złożony kształt, a jej obliczanie odbywa się w drodze tzw. inferencji (wnioskowania), która może być matematycznie zrealizowana na wiele sposobów. Aby przeprowadzić obliczenia inferencyjne blok INFERENCJA musi zawierać następujące, ściśle zdefiniowane elementy:

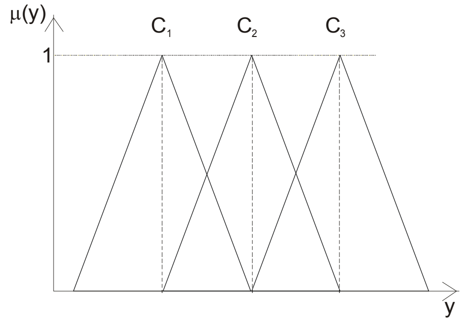
- bazę reguł,
- mechanizm inferencyjny,
- funkcje przynależności wyjścia y modelu.

Baza reguł zawiera reguły logiczne określające zależności przyczynowo-skutkowe istniejące w systemie pomiędzy zbiorami rozmytymi wejść i wyjść. Przykładowo, baza reguł może mieć postać:



Rysunek 1-6. Przykładowa baza reguł regulatora rozmytego.

Przykładowe zbiory rozmyte wejść (A_1 – mały, A_2 – duży) zdefiniowane są na rysunku 2.5, a zbiory rozmyte wyjścia (C_1 – mały, C_2 – średni, C_3 – duży) zdefiniowane są na rysunku 2.7.



Rysunek 1-7. Przykładowe zbiory rozmyte wyjścia: C_1 - mały, C_2 - średni, C_3 - duży.

Mechanizm inferencyjny realizuje zadanie bloku INFERENCJA, tzn. obliczanie wynikowej funkcji przynależności $\mu_{wyn}(y)$. Składa się on z następujących części:

1. Części, która na podstawie stopni spełnienia przesłanek poszczególnych reguł z uwzględnieniem wykorzystywanych w nich operatorów (I albo LUB) oblicza stopień aktywizacji konkluzji reguł.
2. Części określającej wynikową postać funkcji przynależności wyjścia $\mu_{wyn}(y)$ na podstawie stopni aktywizacji konkluzji poszczególnych reguł.

Mając daną funkcję przynależności wyjścia $\mu_{wyn}(y)$ regulator może obliczyć ostrą wartość wyjściową y*. Operację tę realizuje blok DEFUZYFIKACJA.

WSKAZÓWKA: Przykład obliczania wynikowej funkcji przynależności został przedstawiony w punkcie 1.6.4.
UWAGA: Stopnie aktywacji konkluzji poszczególnych reguł mogą być dodatkowo modyfikowane za pomocą tzw. wag. Operacja taka polega na mnożeniu odpowiednich stopni konkluzji przez ustalone wcześniej współczynniki. Stanowi to pewne wzbogacenie mechanizmu inferencji i daje dodatkowe możliwości regulacji parametrów regulatora. Chociaż wagi nie są używane w typowych zastosowaniach logiki rozmytej, zdecydowaliśmy się uwzględnić je w naszym regulatorze w celach badawczych.

1.5 Defuzyfikacja

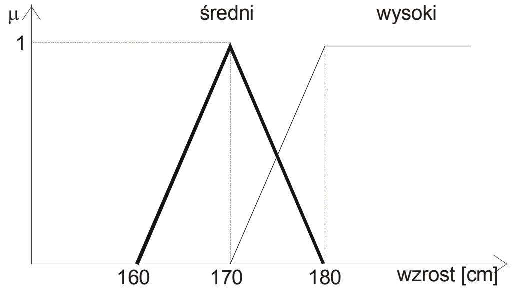
Przez defuzyfikację zbioru rozmytego scharakteryzowanego wyjściową funkcją przynależności $\mu_{wyn}(y)$ uzyskaną w wyniku inferencji należy rozumieć operację określania ostrej wartości y*, reprezentującej ten zbiór w sposób jak najbardziej "sensowny". Oczywiście mogą istnieć różne kryteria oceny sensowności reprezentanta y* zbioru rozmytego. O ilości tych kryteriów świadczy ilość metod defuzyfikacji, z których najbardziej znane to:

- Metoda środka maksimum (*Middle of Maxima*)
- Metoda pierwszego maksimum (*First of Maxima*)
- Metoda ostatniego maksimum (*Last of Maxima*)
- Metoda środka ciężkości (*Center of Gravity*)
- Metoda wysokości (*Height Method*)

Wszystkie te metody zostały zaimplementowane w programie dla sterownika PLC, zostaną więc opisane szerzej w kolejnych paragrafach.

1.5.1 Metoda środka maksimum

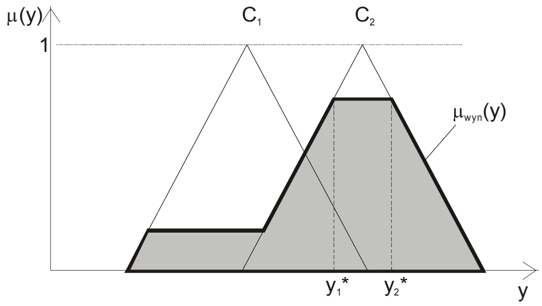
Funkcję przynależności do zbioru rozmytego można rozumieć jako funkcję informującą o podobieństwie poszczególnych elementów zbioru do elementu najbardziej typowego dla tego zbioru. Przykład przedstawia rysunek 2.8.



Rysunek 1-8. Zbiór rozmyty "średni wzrost".

Według funkcji przynależności "średni" wzrost jest, człowiek o wzroście 170 cm jest typowym przedstawicielem tej kategorii wzrostu (przynależność=1), natomiast człowiek o wzroście 175 cm jest średni w stopniu 0.5 i wysoki w stopniu 0.5. Inaczej mówiąc jest częściowo podobny do człowieka o wzroście średnim i wysokim.

Idąc tym tropem możemy stwierdzić, że najbardziej typowym reprezentantem wynikowego zbioru rozmytego scharakteryzowanego funkcją przynależności $\mu_{wyn}(y)$ jest ta wartość y*, dla której stopień przynależności jest najwyższy.



Rysunek 1-9. Wynikowa funkcja przynależności z nieskończoną ilością elementów y o najwyższej przynależności ($y_1^* \le y \le y_2^*$).

Często jednak zbiór takich wartości może zawierać więcej niż jeden element, a nawet nieskończoną ilość elementów. Jest tak na przykład w przypadku przedstawionym na rysunku 2.9. Wyjściem z takiej sytuacji jest uznanie za reprezentanta zbioru wynikowego konkluzji wartości średniej według poniższego wzoru.

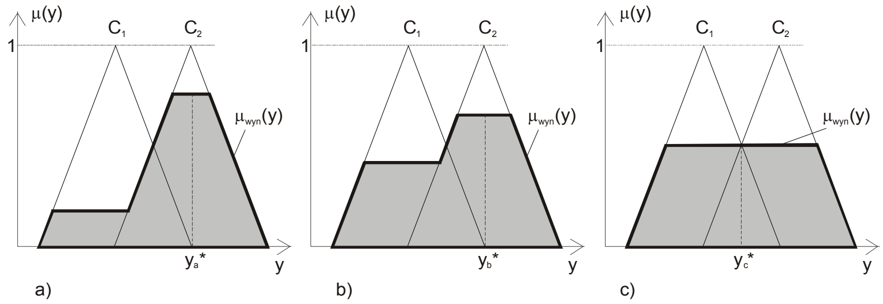
$$\mathbf{y=0.5(y_1^*+y_2^*)}$$

Stąd nazwa metody: metoda środka maksimum.

Zaletą metody jest prostota obliczeniowa ułatwiająca zastosowanie tańszych elementów w układzie sterowania. Prostota obliczeniowa okupiona jest jednak pewnymi wadami.

Wadą metody jest to, że na wynik metody wpływa tylko ten zbiór rozmyty, który jest najbardziej zaktywizowany. Zbiory mniej zaktywizowane nie mają wpływu. Oznacza to również, że na wynik w postaci ostrej wartości wyjściowej y* mają wpływ tylko te reguły bazy reguł, które mają ten zbiór w swojej konkluzji (często jest to tylko jedna

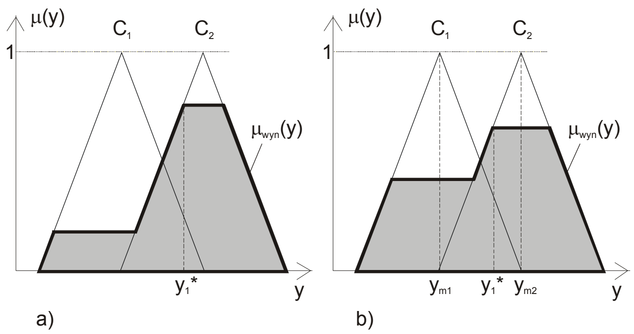
reguła). W ten sposób defuzyfikacja staje się "niedemokratyczna", bowiem nie wszystkie reguły biorą udział w "głosowaniu".
Negatywny skutek tego faktu pokazany jest na rysunku 2.10.
Na rysunku 2.10b stopień aktywizacji zbioru C_1 zwiększył się względem rysunku 2.10a. Natomiast stopień aktywizacji zbioru C_2 zmniejszył się. Jest to skutek zmian wielkości wejściowych regulatora x*. Jednak wynik defuzyfikacji – wyjście regulatora y* jest identyczne dla przypadku a i b (y_a*=y_b*). Oznacza to, że wyjście regulatora nie jest czułe (wrażliwe) na zmiany wejść.



Rysunek 1-10. Ilustracja wad metody środka maksimum (SM).

Czułość metody defuzyfikacji i wynikająca stąd czułość regulatora rozmytego można zdefiniować jako istnienie reakcji wyjścia Δy regulatora na zmiany stopni aktywizacji zbiorów rozmytych konkluzji reguł. Jeżeli porównamy rysunek 2.10b i c to łatwo zauważyć, że nastąpiła tam gwałtowna skokowa zmiana wyniku defuzyfikacji y*, bowiem y_c znacząco różni się od y_b. Oznacza to, że mała zmiana stopnia aktywizacji zbiorów C_1 i C_2 spowodowała duży skok wyjścia modelu Δy. Cecha ta nazywa się nieciągłością metody. W dalszym ciągu podane zostaną dwie podobne metody defuzyfikacji oparte na pomiarze maksimum funkcji przynależności, posiadające jednak większą czułość (wrażliwość) niż metoda środka maksimum.

1.5.2 Metoda pierwszego maksimum



Rysunek 1-11. Defuzyfikacja metodą pierwszego maksimum y*=y_1.

W metodzie pierwszego maksimum za ostrego reprezentanta y* rozmytego zbioru konkluzji wynikowej przyjmuje się najmniejszą wartość y_1 odpowiadającą maksymalnemu stopniowi przynależności $\mu_{wyn}(y)$. Jak pokazuje rysunek 2.11 ze wzrostem stopnia aktywizacji zbioru najbardziej zaktywizowanego (C_2), jego reprezentant y*=y_1 przesuwa w stronę największej wartości y_{m2} tego zbioru. Jeżeli stopień aktywizacji zbioru C_2 zmniejsza się, reprezentant $y^*=y_1$ odsuwa się od największej wartości zbioru C_2 w stronę największej wartości y_{m1} zbioru C_1.

Zalety metody pierwszego maksimum:

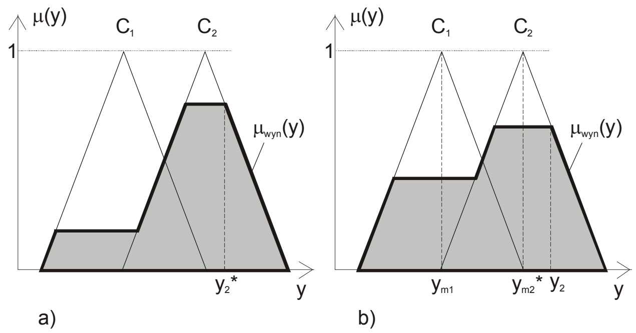
- mały nakład obliczeniowy,
- większa (względem metody średniego maksimum) czułość na zmiany stopnia aktywizacji konkluzji reguł.

Wady metody pierwszego maksimum:

- nieciągłość,
- uwzględnianie w procesie defuzyfikacji tylko jednego, najbardziej zaktywizowanego zbioru.

1.5.3 Metoda ostatniego maksimum

Metoda ostatniego maksimum za ostrego reprezentanta y* rozmytego zbioru konkluzji wynikowej przyjmuje największą wartość y_2 odpowiadającą maksymalnemu stopniowi przynależności $\mu_{wyn}(y)$. Ilustrację metody stanowi rysunek 2.12.

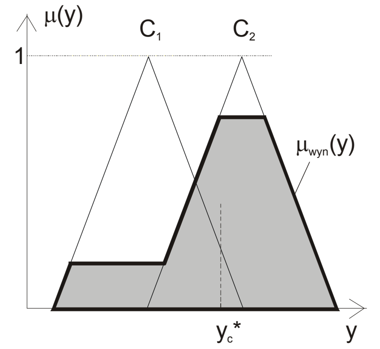


Rysunek 1-12. Defuzyfikacja metodą ostatniego maksimum $y^*=y_2$.

Metoda ostatniego maksimum posiada takie same zalety i wady jak metoda pierwszego maksimum, plus jedną wadę, która zostanie przedstawiona w dalszym ciągu. W przypadku, gdy aktywizacja zbioru C_2 (decydującego o wyborze reprezentanta y*) maleje, a zbioru C_1 rośnie (rośnie znaczenie zbioru C_1 w procesie wnioskowania), co przedstawia rysunek 2.12b wartość $y^*=y_2$ powinna zbliżać się do maksymalnej wartości y_{m1} zbioru C_1. Tymczasem obserwujemy zjawisko odwrotne: wartość y_2 oddala się od tej wartości.

1.5.4 Metoda środka ciężkości

Metoda środka ciężkości za ostrego reprezentanta y* wynikowego zbioru rozmytego zdefiniowanego funkcją przynależności $\mu_{wyn}(y)$ przyjmuje współrzędną y_c^* środka ciężkości powierzchni pod krzywą określoną tą funkcją, patrz rysunek 2.13.

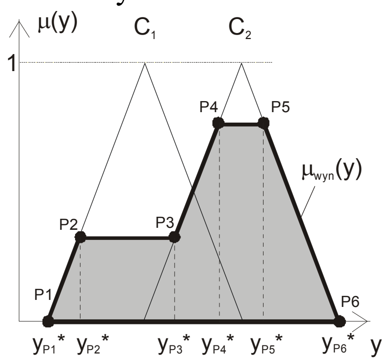


Rysunek 1-13. Defuzyfikacja metodą środka ciężkości.

Wartość współrzędnej y_c środka ciężkości można obliczyć jako iloraz momentu powierzchni pod krzywą $\mu_{wyn}(y)$ względem osi pionowej $\mu(y)$ i wielkości tej powierzchni, co opisuje poniższy wzór:

$$\boxed{y^* = y_c = \frac{\int y\mu_{wyn}(y)dy}{\int \mu_{wyn}(y)dy}}$$

Ze względu na zbyt dużą złożoność obliczeniową klasycznej metody środka ciężkości zdecydowaliśmy się zastosować jedno z jej uproszczeń. Dzięki temu, przy zachowaniu zalet metody, udało nam się znacznie zwiększyć jej wydajność. Uproszczenie polega na zastąpieniu znaku całkowania z licznika wzoru na ostrą wartość wyjściową znakiem sumy. Przy sumowaniu uwzględniamy po kolei punkty charakterystyczne wynikowej funkcji przynależności, tak jak to przedstawia rysunek 2.14.



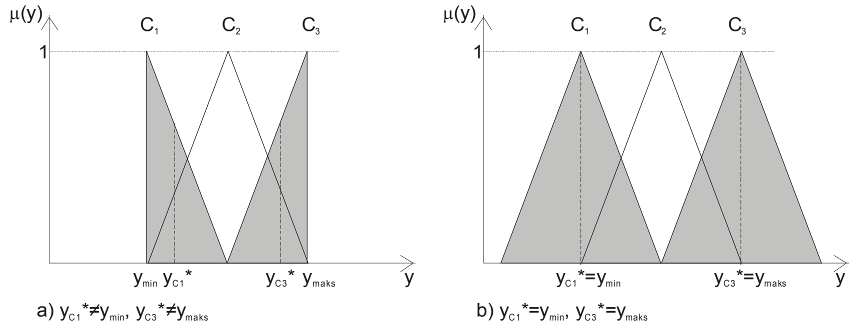
Rysunek 1-14. Ilustracja upraszczania metody środka ciężkości.

Zalety metody środka ciężkości

- Wszystkie zaktywizowane funkcje przynależności konkluzji (wszystkie aktywne reguły) biorą udział w procesie defuzyfikacji. Jest ona "demokratyczna". Gwarantuje to większą niż w przypadku poprzednio opisanych reguł czułość regulatora rozmytego na zmiany jego wejść.

Wady metody środka ciężkości

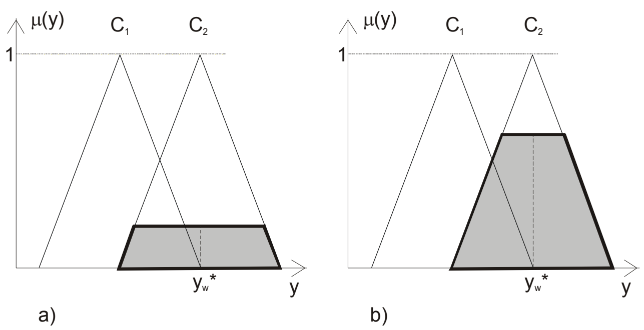
- Duża ilość skomplikowanych obliczeń, co jest związane z całkowaniem powierzchni o nieregularnym kształcie. Istnieje kilka metod upraszczania obliczeń dla metody środka ciężkości, jak na przykład użycie prostokątnych funkcji przynależności.
- Zawężenie zakresu defuzyfikacji (Rysunek 2.15.)



Rysunek 1-15. Zawężenie zakresu defuzyfikacji w pierwotnej metodzie środka ciężkości (a) i usunięcie tej wady w rozszerzonej wersji metody (b).

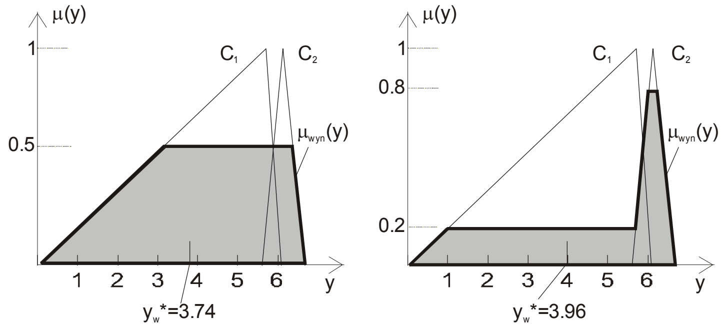
W pierwotnej wersji metody środka ciężkości, nawet jeżeli nastąpi maksymalna aktywizacja brzegowych zbiorów rozmytych konkluzji reguł C_1 lub C_3 wyjście y modelu (regulatora) rozmytego nie może osiągnąć minimalnej (maksymalnej) wartości możliwego zakresu nastaw. Regulator nie mógłby więc wygenerować większych sygnałów sterujących, co obniżyłoby jakość regulacji. Wadę tę można usunąć przez rozszerzenie brzegowych zbiorów rozmytych (Patrz rysunek 2.15b.), dzięki czemu współrzędne środka ciężkości tych zbiorów pokrywają się z granicami zakresu działania y_{min}, y_{max}.

- Nieczułość metody w przypadku aktywizacji tylko jednej funkcji przynależności wyjścia. Jeżeli kilka reguł ma identyczną konkluzję lub aktywizowana jest tylko jedna reguła (Patrz rysunek 2.16.), to mimo zmiany stopnia aktywizacji zbioru wynikowego, współrzędna środka ciężkości y_w nie zmienia się. Oznacza to nieczułość metody na zmiany wejścia.



Rysunek 1-16. Metoda środka ciężkości przy aktywizacji tylko jednego zbioru rozmytego $C_2(y)$ wyjścia modelu.

- Zmniejszenie czułości metody środka ciężkości przy dużym zróżnicowaniu wielkości nośników zbiorów wyjściowych. Problem przedstawiony jest na rysunku 2.17.

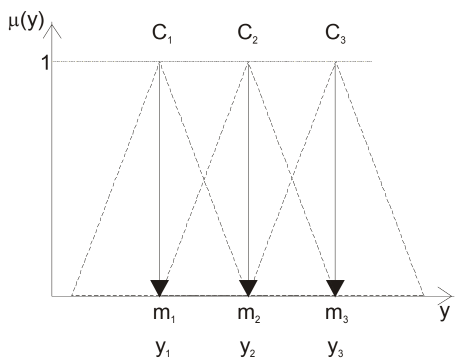


Rysunek 1-17. Ilustracja małego wpływu zmiany stopnia aktywizacji zbiorów wyjściowych C_1 i C_2 na wynik defuzyfikacji.

Przykład zamieszczony na rysunku 2.17 pokazuje, że duża zmiana stopnia aktywacji zbiorów składowych (μ_a: 0.5 – 0.2, μ_b: 0.5 – 0.8) powoduje minimalne przesunięcie współrzędnej środka ciężkości ($y^*=y_c$: 3.74 – 3.96). Powodem takiego stanu rzeczy jest duże zróżnicowanie powierzchni zbiorów składowych C_1 i C_2. Aby uzyskać większy wpływ zmiany stopni aktywizacji $\mu_a(y)$ i $\mu_b(y)$ na zmianę wartości y_c nośniki obu zbiorów powinny być podobne. Warunkiem wysokiej czułości metody jest więc małe zróżnicowanie wielkości poszczególnych zbiorów wynikowych reguł.

1.5.5 Metoda wysokości

Bardzo często zdarza się, iż w bazie reguł modelu rozmytego występują reguły z identycznym zbiorem wynikowym C_i w konkluzjach. Przykładem może ty być stworzony dla naszego modelu zbór reguł, zamieszczony w punkcie 1.6.4. W przypadku poprzednich metod defuzyfikacji wybieraliśmy tę regułę, dla której poziom konkluzji był najwyższy, pozostałe zaś nie były uwzględniane. Metoda wysokości umożliwia uwzględnienie przy obliczaniu ostrej wartości wyjściowej wszystkich reguł z bazy. Kolejną cechą charakterystyczną tej metody jest zastąpienie wyjściowych zbiorów rozmytych ich ostrymi wartościami umieszczonymi w punktach, w których przyjmują one wartości maksymalne $y_j=m_j$. Ilustrację tej metody przedstawia rysunek 2.18.



Rysunek 1-18. Zastępowanie zbiorów rozmytych zbiorami jednoelementowymi.

Po zastąpieniu zbiorów rozmytych właściwymi im zbiorami jednoelementowymi dalsze operacje na nich są identyczne jak w przypadku zwykłych zbiorów rozmytych. Do obliczania wyjścia modelu y* (wyniku defuzyfikacji) stosujemy wzór:

$$\boxed{y^* = \frac{\sum_{j=1}^{m} y_j \mu_{C_j^*}}{\sum_{j=1}^{m} \mu_{C_j^*}}}$$

gdzie m jest ilością reguł.

Zalety metody wysokości:

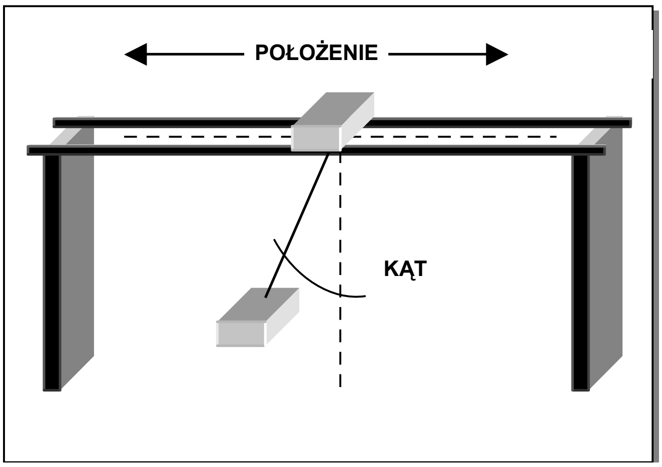
- znaczne zmniejszenie ilości obliczeń w porównaniu z metodą środka ciężkości,
- ciągłość,
- duża czułość.

Ze względu na prostotę obliczeń i pozostałe zalety metoda wysokości (popularnie zwana metodą singletonów) jest często stosowana w modelowaniu i sterowaniu rozmytym.

1.6 Zastosowanie regulatora rozmytego do sterowania suwnicą przenoszącą kontenery.

1.6.1 Opis modelu

Po wstępie teoretycznym opiszemy teraz zastosowanie logiki rozmytej na przykładzie regulatora sterującego układem napędowym suwnicy portowej. Podstawowym zadaniem suwnicy jest przenoszenie kontenerów z jednego miejsca na drugie w taki sposób, by działo się to jak najszybciej. Jednocześnie nie można dopuścić, aby w momencie odkładania kontenera na miejsce docelowe występowały zbyt duże jego kołysania, co mogłoby doprowadzić do zniszczenia ładunku. Jeżeli natomiast wózek z kontenerem znajduje się w dużej odległości od swojego położenia docelowego kołysanie kontenera nie jest groźne. Poniżej znajduje się rysunek modelu suwnicy.



Rysunek 1-19. Ilustracja modelu suwnicy wraz z wykorzystywanymi przez regulator sygnałami.

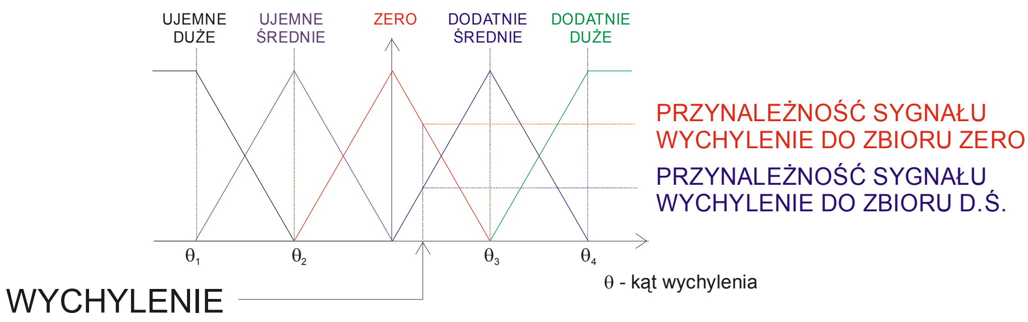
1.6.2 Sygnały wejściowe

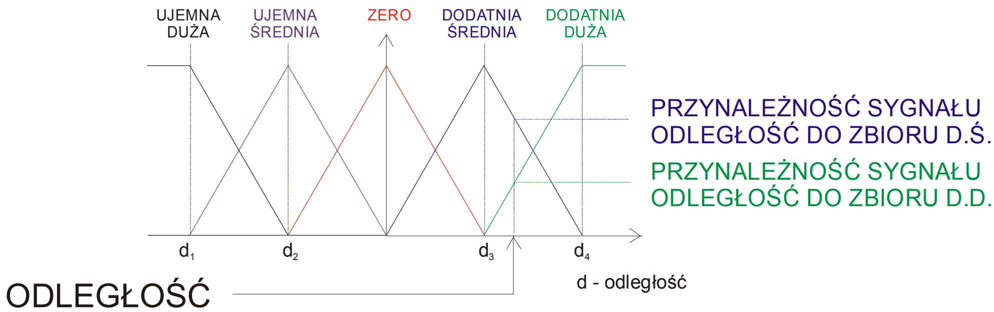
Sygnały wejściowe wykorzystywane w procesie sterowania to:
d – odległość wózka z kontenerem od zadanej pozycji docelowej,
Θ – kąt wychylenia liny z kontenerem od pionu.

1.6.3 Fuzyfikacja

Jak zostało to opisane w części teoretycznej fuzyfikacja jest procesem rozmywania ostrych wartości wejściowych czyli określania ich stopnia przynależności do właściwych zbiorów rozmytych wejścia. W przypadku modelu suwnicy mamy do czynienia z następującymi wejściowymi zbiorami rozmytymi:

- dla sygnału "odległość od miejsca docelowego" zbiory: DUŻA, MAŁA, ZERO.
- dla sygnału "kąt wychylenia" zbiory: UJEMNY DUŻY, UJEMNY MAŁY, ZERO, DODATNI MAŁY, DODATNI DUŻY.





Rysunek 1-20. Ilustracja procesu fuzyfikacji (rozmywania) ostrych wartości wejściowych z użyciem odpowiednich zbiorów rozmytych.

Współrzędne granic poszczególnych zbiorów d_n, θ_n mają znaczący wpływ na działanie regulatora. Optymalne wartości tych współrzędnych dobiera się najczęściej w sposób doświadczalny.
Uzyskane w procesie fuzyfikacji wartości przynależności sygnałów wejściowych do zbiorów rozmytych są przekazywane do następnej części regulatora: bloku INFERENCJA. Należy zauważyć, iż wartości przynależności sygnałów do pozostałych, nie wyróżnionych na rysunku zbiorów wynoszą 0.

1.6.4 Inferencja

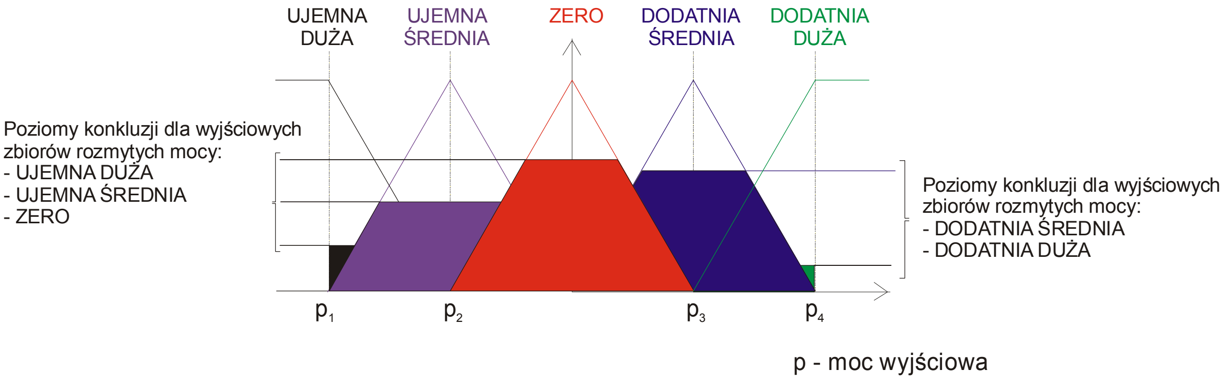
Zadaniem bloku INFERENCJA jest zbudowanie tzw. wynikowej funkcji przynależności $\mu_{wyn}(y)$ wyjścia regulatora. Niezbędna do tego jest baza reguł oraz rozmyte zbiory wyjściowe. Baza reguł określa zależności przyczynowo-skutkowe istniejące w systemie pomiędzy zbiorami rozmytymi wejść i wyjść. Jeżeli chcemy zastąpić pracę człowieka sterowaniem automatycznym, bazę taką możemy zbudować na podstawie obserwacji działania tego człowieka. W przypadku sterownia suwnicą z pewnością zauważylibyśmy, iż jeżeli wózek z kontenerem znajduje się w dużej odległości od swojego położenia docelowego operator nie musi, poprzez odpowiednie nim sterowanie, tłumić dużych wychyleń od pionu liny, na której wisi kontener. W miarę zbliżania się jednak do położenia docelowego należy coraz bardziej wytłumiać kołysania kontenera, po to by nie uległ on zniszczeniu w momencie odkładania. Tego typu sterownie mają nam zapewnić odpowiednio dobrane reguły:

R1: JEŚLI (d = duża)	TO (P = duża)
R2: JEŚLI (d = mała) I (kąt = ujemny duży)	TO (P = dodatnia średnia)
R3: JEŚLI (d = mała) I (kąt = ujemny mały LUB zero LUB dodatni mały)	TO (P = dodatnia średnia)
R4: JEŚLI (d = mała) I (kąt = dodatni duży)	TO (P = ujemna średnia)
R5: JEŚLI (d = zero) I (kąt = dodatni duży LUB mały)	TO (P = ujemna średnia)
R6: JEŚLI (d = zero) I (kąt = zero)	TO (P = zero)
R7: JEŚLI (d = zero) I (kąt = ujemny mały)	TO (P = dodatnia średnia)
R8: JEŚLI (d = zero) I (kąt = ujemny duży)	TO (P = dodatnia duża)

gdzie: d – odległość od celu, P – moc

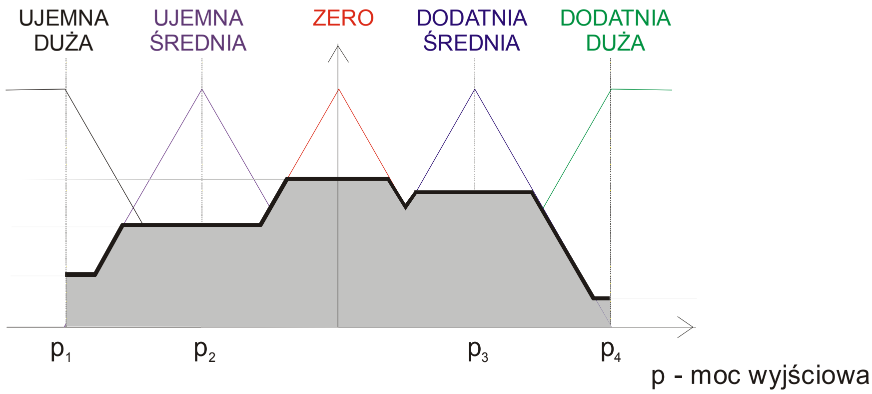
Jeżeli wózek z kontenerem znajduje się w dużej odległości od położenia docelowego, reguła pierwsza powoduje, iż do układu sterowania wysyłany jest sygnał odpowiadający dużej mocy silnika.
Kolejne trzy reguły dotyczą sytuacji, kiedy odległość wózka do położenia docelowego jest mniejsza. Mają one zapewnić stopniowe tłumienie kołysań kontenera na linie.
Cztery następne reguły mają zastosowanie, kiedy wózek znajduje się już bardzo blisko położenia docelowego. Ich głównym zadaniem jest wyhamowanie wózka z kontenerem oraz łagodne (pozbawione kołysań) doprowadzenie go do położenia docelowego.

Wynikiem działania bazy reguł są tzw. poziomy konkluzji poszczególnych reguł, używane do budowania wynikowej funkcji przynależności $\mu_{wyn}(y)$. Dla każdego z wyjściowych zbiorów rozmytych otrzymujemy odpowiedni poziom, który następnie zestawiamy z właściwym zbiorem, budując w ten sposób wynikową funkcję przynależności. Mechanizm ten ilustrują kolejne rysunki:



Rysunek 1-21. Ilustracja wyznaczania wynikowej funkcji przynależności na podstawie wyliczonych przez bazę reguł stopni aktywacji konkluzji poszczególnych reguł oraz wyjściowych zbiorów rozmytych.

Ostateczny kształt wynikowej funkcji przynależności $\mu_{wyn}(y)$:



Rysunek 1-22. Wynikowa funkcja przynależności.

Wynikowa funkcja przynależności jest wykorzystywana przez kolejny blok regulatora do obliczania ostrej wartości sygnału wejściowego – w naszym przypadku jest to sygnał sterujący mocą dla układu napędowego silnika wózka suwnicy.

1.6.5 Defuzyfikacja

Działanie tego bloku jest uzależnione od przyjętej metody defuzyfikacji. W naszych badaniach wykorzystaliśmy pięć najpopularniejszych metod defuzyfikacji. Ich opis znajduje się w rozdziale 1.5