

Bernard WYRWOŁ
POLITECHNIKA ŚLĄSKA, INSTYTUT ELEKTRONIKI

Sprzętowa implementacja algorytmów dekompozycji lingwistycznej opartych na podziale bazy wiedzy w układzie FPGA

dr inż. Bernard WYRWOŁ

Ukończył studia na Wydziale Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej. Pracę doktorską obronił w 2004 roku. Jest adiunktem w Zakładzie Urządzeń Cyfrowych i Mikroprocesorowych Instytutu Elektroniki Politechniki Śląskiej. Jego zainteresowania naukowe obejmują zagadnienia związane z zastosowaniem i sprzętową realizacją systemów wnioskowania przybliżonego, układami logiki programowalnej, językami opisu sprzętu oraz systemami wieloprocessorowymi.



e-mail: Bernard.Wyrwol@polsl.pl

Streszczenie

Układowe realizacje systemów wnioskowania przybliżonego wymagają często znacznych nakładów. Zmniejszenie ich jest możliwe poprzez zastosowanie metody dekompozycji Gupty i przedstawieniu systemu jako struktury hierarchicznej. W celu wyeliminowania jej niekorzystnych właściwości konieczny jest wstępny podział bazy wiedzy. Zaproponowana została metoda najlepszego wyboru wykorzystująca wybrane algorytmy podziału, zaimplementowana w sprzętowym systemie wnioskowania przybliżonego FPGA-FIS.

Słowa kluczowe: funkcja przynależności, reguła rozmyta, reguła sprzeczna, relacja rozmyta, baza wiedzy, dekompozycja relacyjna, dekompozycja lingwistyczna, system regułowy FITA, system relacyjny FATI, wnioskowanie przybliżone, FPGA

Hardware implementation of the linguistic decomposition algorithms based on partitioning the knowledge base in the FPGA chip

Abstract

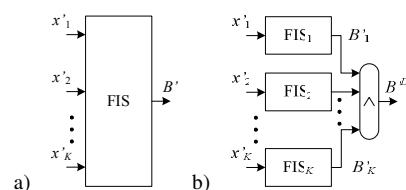
The hardware cost of a fuzzy inference system can be reduced using the Gupta's relational decomposition technique [1]. The system can be represented as a hierarchical architecture that comprises a set of Single Input Single Output subsystems (fig. 1). The decomposition has some disadvantages, computation of the global relation $\mathcal{R}$ is extremely time-consuming process and a large memory is necessary to store it. They can be eliminated if projection is expanded on linguistic level and decomposition is used for knowledge base (1), (fig. 2) [2]. The projection operation (on relational or linguistic level) in some cases can lead to inevitable loss of an information because of its approximate nature [3]. To avoid inference error (the output result is more fuzzy than the output result obtained in the classical system architecture (3)) a partitioning methods (5) the knowledge base $KB[Y, X_K, \dots, X_1]$ into p subbases without inconsistent rules (4) are proposed [4]. In section 3, the methods based on partitioning towards a defined input linguistic variable (fig. 3) and elimination the inconsistent rules (fig. 4) are described [5, 6]. The algorithms are simple and fast, but the results are not optimal in all cases (hardware cost depends on number of subsystems p , tab. 1). Thus the method of the best choice is proposed and implemented in the FPGA fuzzy inference system as a DMU (*Decomposition Management Unit*) module (fig. 6).

Keywords: membership function, fuzzy rule, inconsistent rule, fuzzy relation, knowledge base, relational decomposition, linguistic decomposition, First Inference Then Aggregation system (FITA), First Aggregation Then Inference system (FATI), fuzzy inference, FPGA

1. Wstęp

Systemy wnioskowania przybliżonego, ze względu na sposób reprezentacji wiedzy w systemie oraz metodę wyznaczania wyniku, podzielić można na regułowe FITA (ang. *First Inference then Aggregate*) oraz relacyjne FATI (ang. *First Aggregate then Inference*) [7]. W pierwszych wiedza reprezentowana jest przez zbiór reguł rozmytych *Jeżeli-To*, natomiast w drugim reguły te przekształcane są do postaci funkcji tzw. relacji rozmytej, której argumenty zwykle mają charakter nierozmyty, natomiast

wartości – rozmyte [8, 9]. Praktyczne realizacje tych systemów wymagają znacznych zasobów sprzętowych (w szczególności dla systemów FATI). W celu ich obniżenia system wnioskujący o K wejściach (rys. 1a) można przedstawić w postaci struktury hierarchicznej (rys. 1b) złożonej z K podsystemów rozmytych SISO (ang. *Single Input Single Output*) o takiej samej architekturze, ale różniących się zawartością swoich baz wiedzy, w oparciu o które przeprowadzany jest proces wnioskowania [2, 4].



Rys. 1. Logiczna architektura systemu wnioskowania przybliżonego: a) klasyczna, b) hierarchiczna

Fig. 1. Logical architecture of the fuzzy inference systems: a) classical, b) hierarchical

Jedną z metod pozwalającą przekształcić pierwotną bazę wiedzy do postaci baz wiedzy opisujących zachowanie podsystemów rozmytych w strukturze hierarchicznej jest technika dekompozycji zaproponowana przez Gupta [1]. Wykorzystana ona została w realizacji wyłącznie systemów FATI, a oparta została na tworzeniu subrelacji $\mathcal{R}_K, \dots, \mathcal{R}_1$ przy wykorzystaniu operacji projekcji globalnej relacji rozmytej $\mathcal{R}$. Charakteryzuje się ona znacznymi nakładami zarówno sprzętowymi jak i obliczeniowymi związanymi z koniecznością wyznaczania relacji rozmytej $\mathcal{R}$, niezbędnej do utworzenia subrelacji $\mathcal{R}_K, \dots, \mathcal{R}_1$, a nie wykorzystywanej w czasie normalnej pracy systemu tj. podczas procesu wnioskowania.

Ze względu na to, że globalna relacja rozmyta $\mathcal{R}$ tworzona jest na podstawie zawartości bazy wiedzy regułowego systemu wnioskującego FITA $KB[Y, X_K, \dots, X_1]$, gdzie $Y, X_K, \dots, X_1$ są odpowiednio wyjściową i wejściowymi zmiennymi lingwistycznymi, zaproponowana została metoda, w której to procesowi dekompozycji poddawana jest nie relacja, a baza wiedzy

$$KB_i[Y, X_i] = \text{proj}_{X_K, \dots, X_{i+1}, X_{i-1}, \dots, X_1} KB[Y, X_K, \dots, X_1], \quad (1)$$

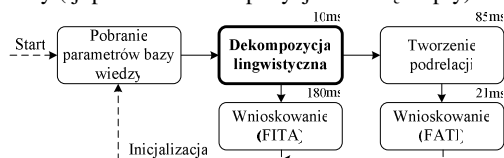
gdzie *proj* jest operacją projekcji przeniesioną na poziom lingwistyczny [2]. Podejście to ma dwie podstawowe zalety: nie jest wymagane obliczanie globalnej relacji rozmytej $\mathcal{R}$, a wyniki uzyskane po przeprowadzeniu dekompozycji lingwistycznej mogą posłużyć zarówno do realizacji regułowego, relacyjnego lub regułowo-relacyjnego systemu wnioskującego o strukturze hierarchicznej.

Metoda dekompozycji Gupty nie jest pozbawiona wad. Operacja projekcji, niezależnie od tego czy zastosowana na poziomie relacyjnym czy też lingwistycznym, powoduje utratę informacji z pierwotnej bazy wiedzy podczas przenoszenia jej i konwersji z systemu o klasycznej architekturze do podsystemów SISO w systemie o architekturze hierarchicznej. Z tego powodu wyniki wnioskowania B' , dla tych samych wartości wielkości wejściowych $x_K, \dots, x_1$, uzyskiwane z obydwu systemów mogą się różnić. Tę niekorzystną własność można całkowicie wyeliminować dokonując wstępnego podziału pierwotnej bazy wiedzy na bazy wiedzy o tym samym wymiarze, dla których to dekompozycja będzie operacją całkowicie bezstratną [2, 4, 5, 6].

2. Dekompozycja lingwistyczna

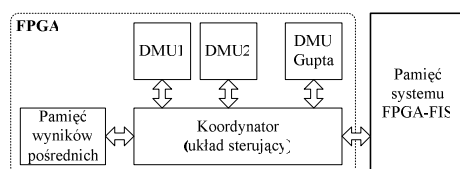
Dekompozycja lingwistyczna bazuje na operacji projekcji (1), która jest odpowiednikiem operacji projekcji wielowymiarowych relacji rozmytych [2, 4]. Zastosowana w odniesieniu do bazy wiedzy systemu o architekturze klasycznej prowadzi do utworzenia baz wiedzy podsystemów SISO $KB_i[Y, X_i]$ ($i=1, \dots, K$), w których to eliminuje się wszystkie zmienne lingwistyczne wejściowe z bazy wiedzy $KB[Y, X_K, \dots, X_1]$ za wyjątkiem zmiennej X_i . W wyniku projekcji lingwistycznej nie ulegają zmianie poprzedniki reguł, natomiast wartości lingwistyczne następników reguł

uniwersalną strukturę modułową. W zależności od potrzeb może on realizować dowolny algorytm wnioskujący, pracować jako system regułowy, relacyjny lub regułowo-relacyjny. Na rys. 5 przedstawiono cykl pracy systemu (z podanymi szacunkowymi czasami realizacji poszczególnych operacji), z wyróżnionym stanem, w którym przeprowadzana jest dekompozycja pierwotnej bazy wiedzy (tj. podział i dekompozycja metodą Gupty).



Rys. 5. Diagram pracy systemu wnioskowania przybliżonego FPGA-FIS
Fig. 5. Work diagram of the fuzzy inference FPGA-FIS system

Realizowana jest ona na drodze sprzętowej, z wykorzystaniem opracowanego modułu DMU (ang. *Decomposition Management Unit*). Zastosowano w nim zaprojektowane moduły realizujące wybrane strategie podziału zaproponowane w [4, 5] i wspomniane w rozdziale 3 (DMU1 i DMU2). Ze względu na to, iż pozwalają one uzyskać różne wartości współczynnika p (5), moduł koordynatora wybiera najlepszy rezultat i przekazuje go do modułu realizującego właściwą dekompozycję lingwistyczną Gupty (rys. 6). Wyniki końcowe zapisywane są w pamięci systemu FPGA-FIS i wykorzystywane do wyznaczania wyniku (system FITA) lub do tworzenia podrelacji (baza wiedzy dla systemu FATI).



Rys. 6. Schemat blokowy modułu DMU
Fig. 6. Block diagram of the DMU module

5. Wnioski

W tabeli 1 zaprezentowano wyniki podziału przykładowych baz wiedzy systemów wnioskujących dla algorytmów opartych na podziale względem wybranej zmiennej (DMU1) oraz kierunku (DMU2) jak również zaproponowanej metody najlepszego wyboru (DMU). Do określania własności zaproponowanych metod wykorzystano bazy wiedzy następujących systemów: regulatory (oznaczone numerami 1 [12], 3 [13], 4 [9]), model bramki ENOR (2) [3], system parkowania ciężarówki (5) [14], regulator temperatury w systemie klimatyzacji (6) [15], system stabilizacji wahadła (7) [16], sterownik wentylatora (8) [17] oraz system identyfikacji układów nieliniowych (9) [18].

Tab. 1. Liczba baz wiedzy p , dla wybranych metod podziału
Tab. 1. Number of knowledge bases p for selected partitioning method

Metoda podziału bazy wiedzy	System wnioskujący (benchmark)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Wartość optymalna	3	2	5	3	5	2	3	2	3
Podz. wzgl. zm. ling. wej. (DMU1)	5	2	5	3	5	3	5	3	5
Podz. wzgl. kier. X1 (DMU2)	3	2	5	4	6	3	3	2	3
Podz. wzgl. kier. X2 (DMU2)	4	2	5	4	5	3	3	3	4
Metoda najlepszego wyboru (DMU)	3	2	5	3	5	3	3	2	3

Można zauważyć, że metoda oparta na wyborze wyniku najlepszego spośród wyników uzyskiwanych metodami DMU1 i DMU2 tylko w jednym przypadku daje wynik gorszy od optymalnego (system (6)). Jej układowa implementacja charakteryzuje się jednak większym nakładem sprzętowym (tab. 2), ale uzyskiwane wyniki pozwalają ograniczyć do niezbędnego minimum liczbę podsystemów w strukturze hierarchicznej, a tym samym obniżyć całkowite nakłady wymagane w realizacji systemu wnioskującego

oraz zminimalizować czas inicjalizacji (tworzenia podrelacji) dla systemu relacyjnego FATI [2, 10, 11].

Tab. 2. Zasoby sprzętowe wymagane do realizacji modułów DMU
Tab. 2. Hardware resources of the DMU modules

Metoda podziału bazy wiedzy (typ modułu)	Liczba			
	Slices	FF	LUTs	Bramki przeł.
DMU1	42	44	54	640
DMU2	170	83	241	2494
DMU Gupta	112	65	207	1831
DMU	356	217	542	6713

6. Literatura

- [1] M. M. Gupta, J. B. Kiszka, G. M. Trojan, "Multivariable Structure of Fuzzy Control Systems", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 16, no. 5, 1986
- [2] B. Wyrwoł, „Sprzętowa realizacja systemu wnioskowania przybliżonego z wykorzystaniem układów logiki programowalnej”, Rozprawa doktorska, Gliwice, 2004
- [3] P. G. Lee, K. Lee Kyun, G. J. Jeon, „An Index of Applicability for the Decomposition Method of Multivariable Fuzzy Systems”, Fuzzy Systems, vol. 3, no. 3, 1995
- [4] B. Wyrwoł, „Technika dekompozycji lingwistycznej oparta na podziale bazy wiedzy systemu wnioskowania przybliżonego”, VI KKE, Dąbrowa Górnicza, tom 1, str. 207-212, 2007
- [5] B. Wyrwoł, „Linguistic decomposition technique based on partitioning the knowledge base of the fuzzy inference system”, BULLETIN OF THE POLISH ACADEMY OF SCIENCES, TECHNICAL SCIENCES, Vol. 56, No. 1, pp. 71-76, 2008
- [6] B. Wyrwoł, „Dekompozycja lingwistyczna bazy wiedzy systemu wnioskowania przybliżonego z eliminacją reguł sprzecznych”, VII KKE, Dąbrowa Górnicza, tom 1, str. 237-242, 2008
- [7] E. Czogała, W. Pedrycz, „Elementy i metody teorii zbiorów rozmytych”, skrypt uczelniany nr 1160, Gliwice 1983
- [8] D. Driankov, H. Hellendoorn, M. Reinfrank, „Wprowadzenie do sterowania rozmytego”, WNT, Warszawa, 1996
- [9] R. R. Yager, D. P. Filev, „Podstawy modelowania i sterowania rozmytego”, WNT, Warszawa, 1995
- [10] B. Wyrwoł, „Regułowo-relacyjny system wnioskowania przybliżonego”, IV KKE, Dąbrowa Górnicza, tom 2, str. 475-480, 2005
- [11] B. Wyrwoł, D. Polok, „Hardware Implementation of the Linguistic Decomposition Technique in the FPGA-FIS System”, Scientific bulletin of the Politechnica University of Timisoara, Transactions on Electron. and Communications, Vol. 53 (67), Fascicula 1, pp. 161-166, '08
- [12] I. Baturone, S. Sanchez-Solano, A. Barriga, J. L. Huertas, „Implementation of CMOS Fuzzy Controllers as Mixed-Signal Integrated Circuits”, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 5, no. 1, 1997
- [13] D. Kim, In-Hyun Cho, „An accurate and cost-effective COG defuzzifier without the multiplier and the divider”, Fuzzy Sets and Systems, vol. 104, 1999
- [14] D. Rutkowska, M. Piliński, L. Rutkowski, „Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte”, PWN, Warszawa-Łódź, 1997
- [15] A. Ollero, A. Garcia-Cerezo, „Direct digital control, auto-tuning and supervision using fuzzy logic”, Fuzzy Sets and Systems, vol. 30, 1989
- [16] T. Yamakawa, „Stabilization of an inverted pendulum by a high-speed fuzzy logic controller hardware system”, Fuzzy Sets and Systems, vol. 32, 1989
- [17] H. D. Hurdon, „Fuzzy logic fan controller”, nti.its.bldrdoc.gov/pub/fuzzy, 1993
- [18] R. Rovatti, R. Guerrieri, G. Baccarani, „An enhanced Two-level Boolean Synthesis Methodology for Fuzzy Rules Minimization”, IEEE Trans. on Fuzzy Systems no. 3, 1995