STUDIA INFORMATICA 2007
Volume 28 Number 4 (74)

Alicja WAKULICZ-DEJA
Uniwersytet Śląski, Instytut Informatyki
Małgorzata PRZYBYŁA-KASPEREK
Uniwersytet Śląski, Instytut Matematyki

HIERARCHICZNY SYSTEM WIELOAGENTOWY

Streszczenie. Praca przedstawia opis procesu podejmowania globalnych decyzji na podstawie reguł decyzyjnych lokalnych systemów ekspertowych, zawierających wzajemnie uzupełniające się obserwacje stanu obiektów, które mogą być również wzajemnie sprzeczne. Zaproponowano organizacje lokalnych systemów ekspertowych w system wieloagentowy o strukturze hierarchicznej.

Słowa kluczowe: system ekspertowy, system wieloagentowy, decyzja globalna

HIERARCHICAL MULTI-AGENT SYSTEM

Summary. The paper presents the process of taking global decisions on the basis of decision rules of local expert systems involving mutually complementary observations of objects which can be mutually contradictory. The author suggests organization of local expert systems into a multi-agent system with a hierarchical structure.

Keywords: expert system, multi-agent system, global decision

1. Wprowadzenie

Systemy wieloagentowe są źródłem wielu nowych narzędzi i technologii wspomagających analizowanie i projektowanie złożonych systemów komputerowych [2 i 7]. Naturalną cechą takich systemów jest kooperacja i koordynacja działań agentów eliminująca chaotyczne działanie jednostki. Agenci współpracują ze sobą, aby osiągnąć jeden cel, który jest poza zasięgiem każdego z nich.

W niniejszej pracy problem podejmowania decyzji globalnej na podstawie reguł decyzyjnych lokalnych systemów ekspertowych rozwiązywany jest poprzez organizację

systemu wieloagentowego, którego celem jest określenie decyzji globalnej. W systemie tym każdy lokalny system ekspertowy jest agentem posiadającym zdolność rozwiązywania problemów z zakresu swojego środowiska, otoczenia.

Ponieważ agenci posiadają dane dotyczące obserwacji stanu obiektów, które się wzajemnie uzupełniają, ale są również wzajemnie sprzeczne, więc naturalne jest występowanie konfliktów pomiędzy agentami. W niniejszej pracy zaproponowany został sposób rozwiązywania konfliktów wiedzy występujących podczas podejmowania decyzji globalnej.

Jedną z pierwszych propozycji sposobu rozwiązywania sytuacji konfliktowych na podstawie o teorii zbiorów przybliżonych jest model Pawlaka [5]. W kolejnych latach rozwijano oraz udoskonalano tę metodę [1 i 6]. W pracy zaproponowano odmienne rozwiązanie sytuacji konfliktowej powstałej pomiędzy agentami podczas podejmowania decyzji.

Założono, że agenci posiadają wspólny język (ontologię) do wymiany informacji.

2. Określenie struktury systemu wieloagentowego

2.1. Agenci zasobów

Niech Ag będzie skończonym zbiorem nazw agentów

$$Ag := \{ag_1, \ldots, ag_n\}.$$

Każdy agent $ag_i \in Ag$, nazywany jest agentem zasobów, gdyż ma on dostęp do pewnych zasobów w postaci tablicy decyzyjnej

$$D_{ag_i} := (U_{ag_i}, A_{ag_i}, d_{ag_i})$$

gdzie: U_{ag_i} jest skończonym niepustym zbiorem zwanym uniwersum, a elementy zbioru U_{ag_i} nazywamy obiektami;

A_{ag_i} jest skończonym niepustym zbiorem atrybutów warunkowych, gdzie każdy atrybut $b \in A_{ag_i}$ jest funkcją $b : U_{ag_i} \to V^b_{ag_i}$, przy czym $V^b_{ag_i}$ jest zbiorem wartości atrybutu b; d_{ag_i} nazywamy atrybutem decyzyjnym, jest to funkcja $d_{ag_i} : U_{ag_i} \to V^d_{ag_i}$, przy czym $V^d_{ag_i}$ jest zbiorem wartości atrybutu d_{ag_i}. Szersze omówienie pojęcia można znaleźć z pracach [3, 4, 12].

Tablica decyzyjna D_{ag_i} jest podtablicą uniwersalnej tablicy decyzyjnej

$$\mathbf{W_{ag_i}} := (W_{ag_i}, A^*_{ag_i}, d^*_{ag_i}),$$

gdzie: W_{ag_i} jest zbiorem wszystkich możliwych obiektów; $A^*_{ag_i}$ jest skończonym niepustym zbiorem atrybutów warunkowych, gdzie każdy atrybut $b^* \in A^*_{ag_i}$ jest funkcją $b^* : W_{ag_i} \to V^{b^*}_{ag_i}$; d_{ag_i} atrybut decyzyjny jest to funkcja $d^*_{ag_i} : W_{ag_i} \to V^{d^*}_{ag_i}$.

Oznacza to, że $U_{ag_i} \subseteq W_{ag_i}$ oraz spełnione są następujące warunki:

$$\forall_{b^* \in A^*_{ag_i}} \forall_{b \in A_{ag_i}} \; b^* /_{U_{ag_i}} = b,$$

$$d^*_{ag_i} /_{U_{ag_i}} = d_{ag_i}.$$

Aby podejmowanie decyzji globalnej na podstawie wiedzy agentów zasobów było sensowne, należy założyć, że

$$\forall_{i,j \in \{1,\ldots,n\}} \; V^d_{ag_i} = V^d_{ag_j}.$$

Dla jasności zapisu wprowadzimy następujące oznaczenia

$$\forall_{i \in \{1,\ldots,n\}} \; V^d_{ag_i} = V^d := \{v^d_1, \ldots, v^d_m\}.$$

Z tych samych powodów nie będziemy rozróżniać atrybutu decyzyjnego dla poszczególnych agentów zasobów

$$\forall_{i \in \{1,\ldots,n\}} \left(d_{ag_i} = d \text{ oraz } d^*_{ag_i} = d^* \right).$$

Dla każdego agenta zasobów definiujemy funkcję podobieństwa.

Definicja 2.1. Niech $\mathbf{W_{ag_i}} := (W_{ag_i}, A^*_{ag_i}, d^*)$ będzie uniwersalną tablicą decyzyjną oraz niech $D_{ag_i} = (U_{ag_i}, A_{ag_i}, d)$ będzie daną tablicą decyzyjną agenta zasobów $ag_i \in Ag$, gdzie $i \in \{1,\ldots n\}$. Wówczas funkcję $f_{ag_i} : W_{ag_i} \times U_{ag_i} \to \mathbb{N} \cup \{0\}$ określoną następującym wzorem

$$f_{ag_i}(x, y) := |\{b \in A_{ag_i} : b(x) = b(y)\}|, \text{ dla } x \in W_{ag_i}, y \in U_{ag_i}$$

nazywamy *funkcją podobieństwa* agenta zasobów.

Dla każdego agenta zasobów oraz dla każdej wartości atrybutu decyzyjnego definiujemy funkcję wyznaczającą największy stopień podobieństwa dla obiektu względem wartości decyzji.

Definicja 2.2. Niech $\mathbf{W_{ag_i}} := (W_{ag_i}, A^*_{ag_i}, d^*)$ będzie uniwersalną tablicą decyzyjną, $D_{ag_i} = (U_{ag_i}, A_{ag_i}, d)$ będzie daną tablicą decyzyjną agenta zasobów $ag_i \in Ag$, gdzie $i \in \{1,\ldots n\}$ oraz niech $v^d_j \in V^d = \{v^d_1, \ldots, v^d_m\}$ będzie pewną wartością atrybutu decyzyjnego. Wówczas funkcję $f^{v^d_j}_{ag_i} : W_{ag_i} \to \mathbb{N} \cup \{0\}$ określoną następującym wzorem

$$f^{v^d_j}_{ag_i}(x) := \max\left\{ f_{ag_i}(x, y) : \; y \in U_{ag_i} \text{ oraz } d(y) = v^d_j \right\}, \text{ dla } x \in W_{ag_i}$$

nazywamy *funkcją wyznaczającą największy stopień podobieństwa* względem decyzji v^d_j.

2.2. Agenci syntezy

Każdy agent zasobów $ag_i \in Ag$ na podstawie obserwacji stanu obiektu $x \in U_{ag_i}$ na zbiorze atrybutów A_{ag_i} potrafi samodzielnie wyznaczyć wartość decyzji dla tego obiektu. Zbiory atrybutów warunkowych różnych agentów zasobów nie muszą być rozłączne.
W większości przypadków część wspólna tych zbiorów będzie niepusta.

Zadaniem systemu wieloagentowego jest podjęcie decyzji globalnej dla pewnego obiektu o zdefiniowanych wartościach na zbiorze atrybutów warunkowych systemu wieloagentowego

$$\mathbb{A} := \bigcup_{i \in \{1,\ldots,n\}} A^*_{AS_j}.$$

Rozsądne wydaje się założenie, że agenci zasobów, którzy wnioskują na podstawie wspólnych atrybutów warunkowych, powinni tworzyć grupę agentów, tzw. klaster.

Definicja 2.3. Niech $Ag = \{ag_1, \ldots ag_n\}$ będzie zbiorem agentów zasobów. *Klastrem* nazywamy najmniejszy, ze względu na relację inkluzji, podzbiór zbioru agentów zasobów $\{ag_{i_1}, \ldots, ag_{i_k}\} \subseteq Ag$, $i_1, \ldots, i_k \in \{1, \ldots, n\}$ spełniający następujące dwa warunki:

$$\forall_{j \in \{1,\ldots,k\}} \; \exists_{l \in \{1,\ldots,k\};\, l \neq j} \; A_{ag_{i_j}} \cap A_{ag_{i_l}} \neq \varnothing, \tag{1}$$

$$\forall_{l \in \{1,\ldots,n\} \setminus \{i_1,\ldots,i_k\}} \; \forall_{j \in \{1,\ldots,k\}} \; A_{ag_l} \cap A_{ag_{i_j}} = \varnothing. \tag{2}$$

Warunek pierwszy powyższej definicji gwarantuje, że agenci wnioskujący na podstawie wspólnych atrybutów warunkowych będą zaliczeni do jednego klastra. Natomiast warunek drugi definicji zapewnia rozłączność zbioru atrybutów warunkowych agentów zasobów, znajdujących się w różnych klastrach.

Zakładamy, że agenci zasobów mogą się ze sobą porozumiewać w obrębie jednego klastra. Jednak każdy agent zasobów ma ograniczoną wiedzę o postaci tablicy decyzyjnej agenta znajdującego się w tej samej grupie. Informacje, jakie agenci zasobów wymieniają między sobą, dotyczą tylko wartości wspólnych atrybutów warunkowych. Zatem, niezbędne jest istnienie agenta nadrzędnego klastra, koordynującego pracę grupy. Agenta spełniającego takie zadanie nazywamy agentem syntezy.

Agent syntezy, ozn. AS, posiada dostęp do zasobów agentów zasobów należących do grupy jemu podrzędnej.

Definicja 2.4. Niech $\{ag_{i_1}, \ldots, ag_{i_k}\}$ będzie klastrem, natomiast AS agentem syntezy tego klastra. Wówczas zasoby agenta AS można zapisać w postaci systemu informacyjnego

$$S_{AS} = (U_{AS}, A_{AS}),$$

gdzie $U_{AS} := U_{ag_{i_1}} \times \ldots \times U_{ag_{i_k}}$; $A_{AS} := A_{ag_{i_1}} \times \{1\} \cup \ldots \cup A_{ag_{i_k}} \times \{k\}$;

$(b, j)(x_1, \ldots, x_k) := b(x_j)$, dla $(x_1, \ldots, x_k) \in U_{AS}$ oraz $(b, j) \in A_{AS}$.

Przy czym system informacyjny S_{AS} jest podsystemem uniwersalnego systemu informacyjnego

$$\mathbf{W_{AS}} := (W_{AS}, A^*_{AS}),$$

gdzie $W_{AS} := W_{ag_{i_1}} \times \ldots \times W_{ag_{i_k}}$; $A^*_{AS} := A^*_{ag_{i_1}} \times \{1\} \cup \ldots \cup A^*_{ag_{i_k}} \times \{k\}$;

$(b, j)(x_1, \ldots, x_k) := b(x_j)$, dla $(x_1, \ldots, x_k) \in W_{AS}$ oraz $(b, j) \in A^*_{AS}$.

Zakładamy ponadto, że agent syntezy zna zbiór wartości atrybutu decyzyjnego V^d.

Zakładamy również, że istnieje możliwość obustronnej wymiany informacji pomiędzy różnymi agentami syntezy oraz agentem syntezy i agentami zasobów należących do klastra podrzędnego wobec tego agenta syntezy.

2.3. Agent menadżer

Agent menadżer, ozn. AM, pełni fundamentalną rolę w systemie wieloagentowym opisanym w niniejszej pracy. Po pierwsze, agent ten rozdziela zadania agentom syntezy. Rolą agenta syntezy jest koordynacja i kooperacja pracy agentów zasobów w obrębie klastra. Zatem, koordynacja procesu podejmowania decyzji na podstawie podanych wartości obserwacji dla atrybutów warunkowych, należących do pewnego podzbioru zbioru $\mathbb{A}$ wszystkich atrybutów warunkowych systemu wieloagentowego. Podzbiory, będące dziedzinami wnioskowania agentów syntezy, wyznaczają podział zbioru atrybutów warunkowych systemu wieloagentowego:

$$\mathbb{A} = \bigcup_{j \in \{1, \ldots, p_1\}} A^*_{AS_{i_{1_j}}} \cup \ldots \cup \bigcup_{j \in \{1, \ldots, p_k\}} A^*_{AS_{i_{k_j}}},$$

gdzie podzbiory $\{ag_{i_{1_1}}, \ldots, ag_{i_{1_{p_1}}}\}, \ldots, \{ag_{i_{k_1}}, \ldots, ag_{i_{k_{p_k}}}\}$ są klastrami takimi, że

$$\bigcup_{j=1}^{k} \{ag_{i_{j_1}}, \ldots, ag_{i_{j_{p_j}}}\} = Ag.$$

Głównym zadaniem agenta menadżera jest asocjacja decyzji podjętych przez grupy agentów w jedną wartość decyzji lub podzbiór wartości decyzji dla danego obiektu. Zatem, agent menadżer musi mieć dostęp do zasobów agentów syntezy.

Definicja 2.5. Niech $AS_1, \ldots, AS_k$ będzie zbiorem k agentów syntezy nadzorujących pracę pewnych klastrów, stanowiących podział zbioru agentów zasobów Ag. Wówczas zasoby agenta menadżera mają postać systemu informacyjnego

$$S_{AM} = (U_{AM}, A_{AM})$$

gdzie $U_{AM} := U_{AS_1} \times \ldots \times U_{AS_k}$; $A_{AM} = A_{AS_1} \cup \ldots \cup A_{AS_k}$;

$b(x_1,\ldots,x_k) := b(x_j)$, dla $(x_1,\ldots,x_k) \in U_{AM}$ oraz $b \in A_{AS_j} \subset A_{AM}$.

Przy czym system informacyjny S_{AM} jest podsystemem uniwersalnego systemu informacyjnego

$$\mathbf{W_{AM}} := (W_{AM}, A^*_{AM}),$$

gdzie $W_{AM} := W_{AS_1} \times \ldots \times W_{AS_k}$; $A^*_{AM} := A^*_{AS_1} \cup \ldots \cup A^*_{AS_k}$;

$b(x_1,\ldots,x_k) := b(x_j)$, dla $(x_1,\ldots,x_k) \in W_{AM}$ oraz $b \in A^*_{AS_j} \subset A^*_{AM}$.

Zakładamy ponadto, że agent menadżer zna zbiór wartości atrybutu decyzyjnego V^d.

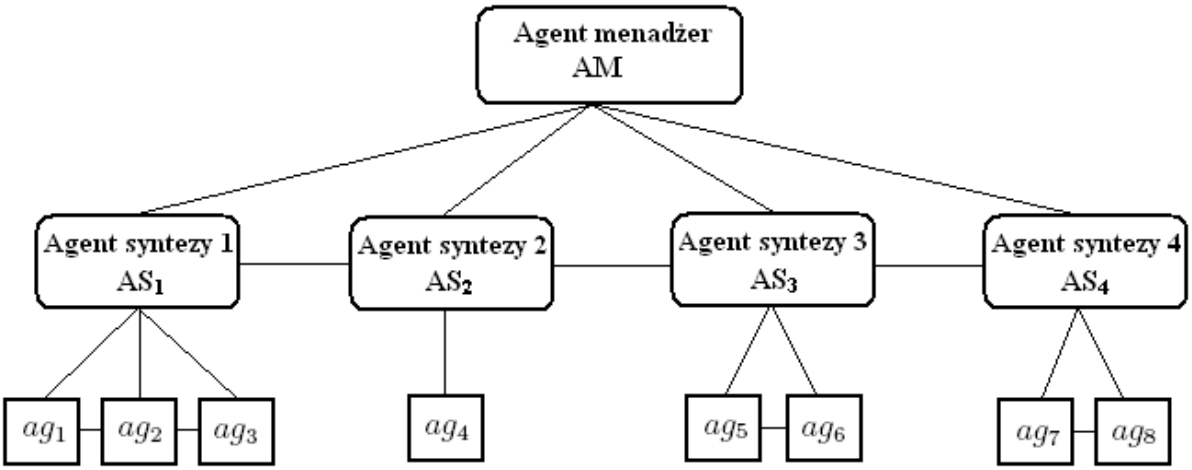
Ostatnim zadaniem agenta menadżera jest sprawdzenie, czy dokładność, z jakim podjęta została decyzja, spełnia warunki zadania systemu wieloagentowego.

Na poniższym rysunku przedstawiona została struktura przykładowego systemu wieloagentowego, gdzie $Ag = \{ag_1,\ldots,ag_8\}$ oraz zbiory atrybutów warunkowych agentów zasobów spełniają następujące warunki:

$$\forall_{i\in\{1,2,3\}} \exists_{j\in\{1,2,3\};\, j\neq i}\ Ag_i \cap Ag_j \neq \varnothing,\ A_{ag_5} \cap A_{ag_6} \neq \varnothing,\ A_{ag_7} \cap A_{ag_8} \neq \varnothing,$$

$$\forall_{i\in\{1,2,3\}} \forall_{j\in\{5,6,7,8\}}\ A_{ag_i} \cap A_{ag_j} = \varnothing,\ \forall_{i\in\{5,6\}} \forall_{j\in\{7,8\}}\ A_{ag_i} \cap A_{ag_j} = \varnothing,$$

$$\forall_{i\in\{1,2,3,5,6,7,8\}}\ A_{ag_4} \cap A_{ag_i} = \varnothing.$$



Rys. 1. Struktura systemu wieloagentowego
Fig. 1. Structure of the multi-agent system

3. Schemat decyzyjny

W celu wyjaśnienia schematu podejmowania decyzji przez system wieloagentowy wprowadzimy najpierw definicję formuły oraz pojęcie spełnialności formuły [3, 4].

Definicja 3.1. Niech $S=(U,A)$ będzie systemem informacyjnym. Wówczas *formułą atomową* nazywamy wyrażenie o postaci (b,v), gdzie $b \in A$ oraz $v \in V^b$.

Mówimy, że obiekt $x \in U$ spełnia formułę atomową (b,v) w systemie S, ozn. $x \models_S (b,v)$, wtedy i tylko wtedy, gdy

$$\mathrm{b}(\mathrm{x}) = \mathrm{v}.$$

Definicja 3.2. Niech $S=(U,A)$ będzie systemem informacyjnym oraz niech zbiór $P=\{b_1,\ldots,b_k\}$ będzie podzbiorem zbioru atrybutów A. Wówczas każdą formułę α o postaci

$$\alpha=(b_1,v_1)\wedge\ldots\wedge(b_k,v_k),\ \text{gdzie } v_i \in V^{b_i}, i \in \{1,\ldots,k\}$$

nazywamy P *-formułą*. Jeśli $P=A$, to wyrażenie α nazywamy *formułą*.

Mówimy, że obiekt $x \in U$ spełnia P- formułę α w systemie S, ozn. $x \models_S \alpha$, wtedy i tylko wtedy, gdy

$$\forall_{i\in\{1,\ldots,k\}}\ x \models_S (b_i,v_i).$$

Zgodnie z zapowiedzią opiszemy teraz schemat podejmowania decyzji przez system wieloagentowy. Załóżmy, że $\{ag_1,\ldots,ag_n\}$ jest zbiorem agentów zasobów oraz $\{AS_1,\ldots,AS_r\}$ jest zbiorem agentów syntezy. Na początku agent menadżer otrzymuje pewne zadanie, polegające na wyznaczeniu wartości decyzji dla obiektu spełniającego formułę α, która to jest określona na zbiorze atrybutów warunkowych systemu wieloagentowego $\mathbb{A}$. Decyzja podjęta przez system wieloagentowy powinna spełniać zadany stopień dokładności decyzji. Dla skupienia uwagi załóżmy, że

$$\alpha=(b_1,v_1)\wedge\ldots\wedge(b_k,v_k),\ \text{gdzie } v_i \in V^{b_i},\ i=1,\ldots,k \text{ oraz } \{b_1,\ldots,b_k\}=\mathbb{A}.$$

Wówczas agent menadżer, który ma dostęp do zasobów agentów syntezy, przekazuje odpowiednią część formuły α do każdego z agentów syntezy. Oznacza to, że jeśli agent syntezy AS_j koordynuje pracę klastra $\{ag_{i_{j_1}},\ldots,ag_{i_{j_{p_j}}}\} \subseteq Ag$, to otrzymuje on formułę będącą obcięciem formuły α do zbioru $A^*_{AS_j}$, ozn. $\alpha_{/A^*_{AS_j}}$, zdefiniowanym w następujący sposób:

$$\alpha_{/A^*_{AS_j}} := (b_{i_1},v_{i_i})\wedge\ldots\wedge(b_{i_g},v_{i_g}),$$

gdzie $\{i_1,\ldots,i_g\} \subseteq \{1,\ldots,k\}$ oraz $\{b_{i_1},\ldots,b_{i_g}\}=\bigcup_{l=j_1}^{j_{p_j}} A^*_{AS_{i_l}}$.

Następnie rozpoczyna się proces podejmowanie decyzji w obrębie klastra.

3.1. Schemat podejmowania decyzji w obrębie klastra

Agent syntezy AS_j, który koordynuje pracę klastra $\{ag_{i_{j_1}},\ldots,ag_{i_{j_{p_j}}}\}$, po otrzymaniu zadania polegającego na wyznaczeniu wartości decyzji dla obiektu spełniającego formułę $\alpha_{/A^*_{AS_j}}$, przekazuje każdemu agentowi zasobów $ag_{i_l}, l \in \{j_1,\ldots,j_{p_j}\}$ należącemu do podrzędnego mu klastra, formułę β_l będącą obcięciem formuły $\alpha_{/A^*_{AS_j}}$ do zbioru $A^*_{ag_{i_l}}$. Obcięcie zdefiniowane jest w następujący sposób:

$$\beta_l := (b_{t_1}, v_{t_1}) \wedge \ldots \wedge (b_{t_o}, v_{t_o}),$$

gdzie $\{t_1,\ldots,t_o\} \subseteq \{i_1,\ldots,i_g\}$ oraz $\{b_{t_1},\ldots,b_{t_o}\} = A^*_{ag_{i_l}}$.

Z definicji klastra wynika, że zbiory atrybutów warunkowych, na których są określone formuły $\beta_{j_1},\ldots,\beta_{j_{p_j}}$, nie są parami rozłączne.

Po tej operacji agenci zasobów rozpoczynają proces wyznaczania wartości funkcji

$$f^{v_k^d}_{ag_{i_l}}, \text{ dla } l = j_1,\ldots,j_{p_j}, \text{ oraz } k = 1,\ldots,m$$

dla obiektu $x_l \in W_{ag_{i_l}}$ spełniającego formułę β_l, $x_l \models_{W_{ag_{i_l}}} \beta_l$. Następnie agenci zasobów, wymieniając informację w obrębie klastra, dla każdego $k \in \{1,\ldots,m\}$ sprawdzają, czy dla zbioru obiektów

$$\left\{y_l : y_l \in U_{ag_{i_l}} \text{ oraz } f_{ag_{i_l}}(x_l, y_l) = f^{v_k^d}_{ag_{i_l}}(x_l),\ \ l = j_1,\ldots,j_{p_j}\right\}$$

realizujących największy stopień podobieństwa do obiektu x_l względem decyzji v_k^d, wartości na atrybutach wspólnych są identyczne.

Jeśli zachodzi powyższa własność, to do informacji zawierającej zbiór wartości funkcji

$$\left\{f^{v_k^d}_{ag_{i_l}}(x_l) : l = j_1,\ldots,j_{p_j}\right\}$$

dołączana jest informacja o braku konfliktu między agentami zasobów przy podejmowaniu decyzji v_k^d dla zadanego obiektu w obrębie jednego klastra. W przeciwnym wypadku do informacji

$$\left\{f^{v_k^d}_{ag_{i_l}}(x_l) : l = j_1,\ldots,j_{p_j}\right\}$$

dołączana jest informacja o zaistnieniu konfliktu między agentami zasobów przy podejmowaniu decyzji v_k^d dla zadanego obiektu w obrębie jednego klastra. Taki pakiet informacji przesyłany jest do agenta syntezy AS_j. Następnie rozpoczyna się proces podejmowania decyzji na poziomie agentów syntezy.

3.2. Schemat podejmowania decyzji na poziomie agenta syntezy

Agent syntezy po otrzymaniu pakietu informacyjnego oblicza proponowaną wartość decyzji za pomocą funkcji decyzyjnej agenta syntezy.

Definicja 3.3. Niech AS będzie agentem syntezy koordynującym pracę klastra $\{ag_1,\ldots,ag_p\}$ oraz niech $\mathbf{W_{AS}} = (W_{AS}, A^*_{AS})$ będzie uniwersalnym systemem informacyjnym, a $S_{AS} = (U_{AS}, A_{AS})$ będzie danym systemem informacyjnym agenta syntezy AS. Wówczas multifunkcję $\gamma_{AS} : W_{AS} \to 2^{V^d}$ określoną następującym wzorem

$$\gamma_{AS}(x) := \left\{ v^d \in V^d : \sum_{i=1}^{p} f_{ag_i}^{v^d}(x_i) = \max\left\{ \sum_{i=1}^{p} f_{ag_i}^{v_l^d}(x_i) : v_l^d \in V^d \right\} \right\}, \text{ dla } x \in W_{AS},$$

gdzie $x_i \in W_{ag_i}$ oraz spełniony jest warunek

$$\text{jeśli } x \models_{W_{AS}} \alpha \text{ to } x_i \models_{W_{ag_i}} \alpha /_{A^*_{ag_i}}, \text{ dla } i = 1,\ldots,p$$

nazywamy *funkcją decyzyjną* agenta syntezy.

Każdy agent syntezy systemu wieloagentowego wyznacza wartość funkcji decyzyjnej dla obiektu $\overline{x}_j \in W_{AS_j}$ spełniającego formułę $\alpha /_{A^*_{AS_j}}$,

$$\overline{x}_j \models_{W_{AS_j}} \alpha /_{A^*_{AS_j}}.$$

Następnie, wymieniając informację między sobą, agenci syntezy sprawdzają, czy zbiór

$$D := \bigcap_{j=1}^{r} \gamma_{AS_j}(\overline{x}_j)$$

jest niepusty.

Jeżeli zbiór powyższy jest niepusty, wtedy agenci syntezy sprawdzają, czy istnieją wartości decyzji $v^d \in D$, dla których nie wystąpił konflikt pomiędzy agentami zasobów przy podejmowaniu tej decyzji. Jeśli takie wartości istnieją, to agenci modyfikują zbiór D tak, aby pozostały w nim tylko wartości decyzji bezkonfliktowe, w przeciwnym wypadku zbiór D pozostawiony jest bez zmian.

Agent menadżer otrzymuje od agentów syntezy pakiet informacji zawierający zbiór D oraz zbiór wartości

$$\left\{ \mu_j(\overline{x}_j) := \sum_{l=j_1}^{j_{p_j}} f_{ag_{i_l}}^{v^d}(x_l), j = 1,\ldots,r \right\}, \text{ dla pewnego } v^d \in D.$$

Jeśli jednak $D = \varnothing$, wówczas każdy z agentów syntezy AS_j, $j = 1,\ldots,r$ przesyła do agenta menadżera pakiet informacji o postaci

$$\left\{\left(\mu_j^{v_k^d}(\overline{x}_j), c_j^{v_k^d}\right) : \mu_j^{v_k^d}(\overline{x}_j) := \sum_{l=j_1}^{j_{p_j}} f_{ag_{i_l}}^{v_k^d}(x_l),\ c_j^{v_k^d} = 0 \text{ brak konfliktu, } c_j^{v_k^d} = 1 \right.$$

$$\left. \text{wystąpił konflikt, } k = 1,\ldots,m \right\}.$$

Następnie rozpoczyna się proces agregacji i oceny decyzji na poziomie agenta menadżera.

3.3. Agregacja i ocena decyzji na poziomie agenta menadżera

Agent menadżer w zależności od postaci informacji, jakie otrzymał od agentów syntezy, podejmuje różne działania.

W pierwszym przypadku, gdy zbiór $D \neq \emptyset$, rola agenta menadżera ogranicza się do oceny stopnia dokładności podjętej decyzji. Ocena ta dokonywana jest za pomocą współczynnika dokładności.

Definicja 3.4. Niech AM będzie agentem menadżerem oraz niech $\{AS_1,\ldots,AS_r\}$ będzie zbiorem agentów syntezy. Wówczas *współczynnikiem dokładności* nazywamy funkcję $\mu : W_{AM} \to [0,1]$ określoną następującym wzorem:

$$\mu(x) := \frac{\sum_{j=1}^{r} \mu_j(\overline{x}_j)}{|A_{AM}|},$$

gdzie obiekty $\overline{x}_j \in W_{AS_j}$, spełniają następujący warunek:

$$\text{jeśli } x \models_{W_{AM}} \alpha \text{ to } \overline{x}_j \models_{W_{AS_j}} \alpha / A^*_{AS_j} \text{ dla każdego } j = 1,\ldots,r.$$

Analogicznie definiujemy *współczynnik dokładności względem decyzji* $v^d \in V^d$, wstawiając w definicji współczynnika dokładności wartości $\mu_j^{v^d}(\overline{x}_j)$ zamiast $\mu_j(\overline{x}_j)$, dla $j = 1,\ldots,r$. Dla współczynnika dokładności względem decyzji v^d przyjmujemy oznaczenie μ^{v^d}.

Jeśli podjęta decyzja spełnia podany w zadaniu współczynnik dokładności, agent menadżer udziela pozytywnej odpowiedzi do zadania i w odpowiedzi przesyła zbiór decyzji D. Jeśli jednak współczynnik dokładności nie spełnia warunków zadania, agent menadżer przesyła informacje o niemożliwości podjęcia decyzji z zadanym współczynnikiem dokładności.

W przypadku gdy $D = \emptyset$, agent menadżer oblicza współczynnik dokładności dla każdej wartości decyzji ze zbioru V^d, a następnie wybiera decyzje maksymalizujące współczynnik dokładności. Zatem, agent menadżer wyznacza nowy zbiór

$$D := \left\{ v^d \in V^d : \mu^{v^d}(x) = \max\{\mu^{v_k^d}(x) : v_k^d \in V^d\} \right\}.$$

Następnie agent menadżer sprawdza, czy współczynnik dokładności decyzji ze zbioru D spełnia warunki zadania. Jeśli warunki zadania nie są spełnione, agent menadżer przesyła informacje o niemożliwości podjęcia decyzji z zadanym współczynnikiem dokładności.

Jeśli jednak warunki zadania są spełnione, agent menadżer sprawdza, czy w zbiorze D istnieją takie wartości decyzji v^d, dla których nie powstał konflikt między agentami zasobów podczas podejmowania tej decyzji. Zatem agent menadżer sprawdza, czy spełniony jest warunek:

$$\exists_{v^d \in D} \ \forall_{j \in \{1,\ldots,r\}} \ c_j^{v^d} = 0. \tag{3}$$

Jeśli warunek jest spełniony, wówczas agent menadżer modyfikuje zbiór D tak, aby dla każdej wartości $v^d \in D$ spełniony był warunek (3). W przeciwnym wypadku agent menadżer pozostawia zbiór D bez zmian. Następnie agent menadżer udziela pozytywnej odpowiedzi do zadania i przesyła zbiór decyzji D.

4. Przykłady zastosowania systemu wieloagentowego do podejmowania decyzji globalnych

W tej części pracy rozważymy dwa problemy, polegające na wyznaczeniu decyzji globalnej, dla obiektu spełniającego formułę α, na podstawie wiedzy lokalnych systemów ekspertowych.

Przykład 4.1. Niech $Ag := \{ag_1, ag_2, ag_3, ag_4\}$ będzie zbiorem agentów zasobów. Każdy z agentów $ag_i \in Ag$, $i = 1,\ldots,4$ ma dostęp do tablicy decyzyjnej $D_{ag_i} = \left(U_{ag_i}, A_{ag_i}, d\right)$. Postacie tablic decyzyjnych przedstawione zostały poniżej.

Tabela 1

Tablice decyzyjne agentów zasobów

U_{ag_1}	a	b	c	d
1	1	1	1	0
2	0	1	1	1
3	0	0	0	2
4	1	0	0	1
5	0	0	1	2

U_{ag_2}	a	c	e	f	d
1	1	1	0	0	1
2	0	0	1	0	2
3	1	0	0	1	0
4	1	1	1	1	2
5	0	0	0	0	0

U_{ag_3}	g	h	i	d
1	0	0	0	0
2	0	1	1	1
3	1	0	1	2
4	1	0	0	2
5	0	0	1	1

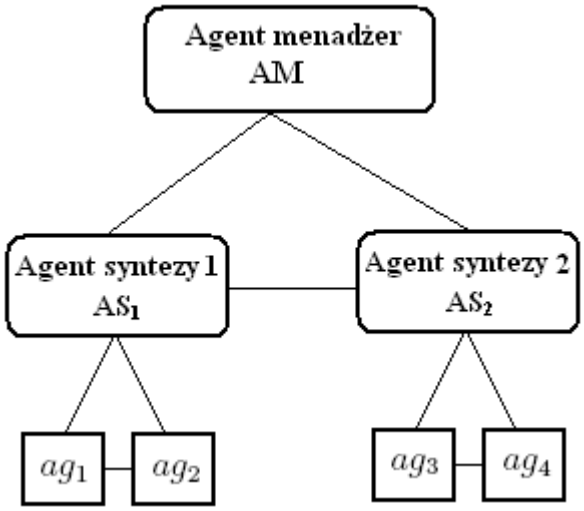
U_{ag_4}	h	j	k	d
1	1	0	1	0
2	1	1	1	1
3	0	0	1	1
4	0	1	1	2
5	1	1	0	2

Należy wyznaczyć wartość decyzji dla obiektu spełniającego formułę α o postaci

$$\alpha = (a,1) \wedge (b,0) \wedge (c,1) \wedge (e,1) \wedge (f,1) \wedge (g,0) \wedge (h,0) \wedge (i,1) \wedge (j,1) \wedge (k,1).$$

Współczynnik dokładności decyzji powinien być nie mniejszy niż 0,8.

Zauważmy najpierw, że rozważany system wieloagentowy będzie miał następującą strukturę:



Rys. 2. Struktura systemu wieloagentowego
Fig. 2. Structure of the multi-agent system

W poniższej tabeli przedstawione zostały formuły, które otrzymają poszczególni agenci.

Tabela 2

Formuły przesłane agentom

Agent	Formuła
AM	$\alpha = (a,1) \wedge (b,0) \wedge (c,1) \wedge (e,1) \wedge (f,1) \wedge (g,0) \wedge (h,0) \wedge (i,1) \wedge (j,1) \wedge (k,1)$
AS_1	$\alpha /_{A^*_{AS_1}} = (a,1) \wedge (b,0) \wedge (c,1) \wedge (e,1) \wedge (f,1)$
ag_1	$\beta_1 = (a,1) \wedge (b,0) \wedge (c,1)$
ag_2	$\beta_2 = (a,1) \wedge (c,1) \wedge (e,1) \wedge (f,1)$
AS_2	$\alpha /_{A^*_{AS_2}} = (g,0) \wedge (h,0) \wedge (i,1) \wedge (j,1) \wedge (k,1)$
ag_3	$\beta_3 = (g,0) \wedge (h,0) \wedge (i,1)$
ag_4	$\beta_4 = (h,0) \wedge (j,1) \wedge (k,1)$

Wartości funkcji $f^{v_j^d}_{ag_i}(x_i)$, gdzie $i \in \{1,2,3,4\}$, $j \in \{1,2,3\}$, przy czym

$v_1^d = 0,\ v_2^d = 1, v_3^d = 2$ oraz

$\forall_{i \in \{1,2,3,4\}}\ x_i \in W_{ag_i} \wedge x_i \models_{W_{ag_i}} \beta_i$

zostały przedstawione w tabeli 3.

Tabela 3

Wartości funkcji wyznaczającej największy stopień podobieństwa względem decyzji

	ag_1	ag_2	ag_3	ag_4
$v_1^d = 0$	$f^0_{ag_1}(x_1) = 2$	$f^0_{ag_2}(x_2) = 2$	$f^0_{ag_3}(x_3) = 2$	$f^0_{ag_4}(x_4) = 1$
$v_2^d = 1$	$f^1_{ag_1}(x_1) = 2$	$f^1_{ag_2}(x_2) = 2$	$f^1_{ag_3}(x_3) = 3$	$f^1_{ag_4}(x_4) = 2$
$v_3^d = 2$	$f^2_{ag_1}(x_1) = 2$	$f^2_{ag_2}(x_2) = 4$	$f^2_{ag_3}(x_3) = 2$	$f^2_{ag_4}(x_4) = 3$

Ostatecznie pakiety informacji, jakie otrzymają agenci syntezy AS_1 oraz AS_2, będą następujące

Tabela 4

Pakiety informacji przesłane agentom syntezy

AS_1	ag_1	ag_2	Konflikt
$v_1^d = 0$	2	2	Tak
$v_2^d = 1$	2	2	Tak
$v_3^d = 2$	2	4	Tak

AS_2	ag_3	ag_4	Konflikt
$v_1^d = 0$	2	1	Tak
$v_2^d = 1$	3	2	Nie
$v_3^d = 2$	2	3	Nie

Następnie agenci syntezy wyznaczają wartości funkcji decyzyjnych dla obiektów $\overline{x}_1 \in W_{AS_1}$, $\overline{x}_2 \in W_{AS_2}$ spełniających warunki:

$\overline{x}_1 \models_{W_{AS_1}} \alpha /_{A^*_{AS_1}}$ oraz $\overline{x}_2 \models_{W_{AS_2}} \alpha /_{A^*_{AS_2}}$.

Wartości funkcji decyzyjnych są następujące:

$$\gamma_{AS_1}(\overline{x}_1) = \{v_3^d\} \text{ oraz } \gamma_{AS_2}(\overline{x}_2) = \{v_2^d, v_3^d\}.$$

Zatem

$$D = \{v_3^d\}.$$

Przy podejmowaniu decyzji v_3^d wystąpił konflikt pomiędzy agentami ag_1 i ag_2, ale do zbioru D nie należą inne wartości decyzji, więc zbiór D pozostaje niezmieniony.

Pakiet informacji, jaki otrzymuje agent menadżer, przedstawiony został w tabeli 5.

Tabela 5

Pakiet informacji przesłany agentowi menadżerowi

$D = \{v_3^d\}$	$\mu_1(\overline{x}_1) = 6$	$\mu_2(\overline{x}_2) = 5$

Stąd agent menadżer wnioskuje, że decyzja dla obiektu $x \in W_{AM}$ takiego, że $x \models_{W_{AM}} \alpha$ wynosi $d(x) = 2$ i została ona podjęta ze współczynnikiem dokładności

$$\mu(x) = \frac{11}{13} \approx 0,85.$$

Zatem odpowiedź na zadanie jest pozytywna i wynosi $v_3^d = 2$.

Przykład 4.2. Niech $Ag := \{ag_1, ag_2, ag_3, ag_4\}$ będzie zbiorem agentów zasobów, mających dostęp do tablic decyzyjnych podanych w przykładzie 4.1. Należy wyznaczyć wartość decyzji dla obiektu spełniającego formułę α o postaci

$$\alpha = (a,1) \wedge (b,1) \wedge (c,0) \wedge (e,0) \wedge (f,0) \wedge (g,1) \wedge (h,0) \wedge (i,1) \wedge (j,1) \wedge (k,0).$$

Współczynnik dokładności decyzji powinien być nie mniejszy niż 0,6.

Struktura systemu wieloagentowego będzie taka sama jak w przykładzie poprzednim. W tabeli 6 przedstawiono formuły, które otrzymają poszczególni agenci.

Tabela 6

Formuły przesłane agentom

Agent	Formuła
AM	$\alpha = (a,1) \wedge (b,1) \wedge (c,0) \wedge (e,0) \wedge (f,0) \wedge (g,1) \wedge (h,0) \wedge (i,1) \wedge (j,1) \wedge (k,0)$
AS_1	$\alpha /_{A^*_{AS_1}} = (a,1) \wedge (b,1) \wedge (c,0) \wedge (e,0) \wedge (f,0)$
ag_1	$\beta_1 = (a,1) \wedge (b,1) \wedge (c,0)$
ag_2	$\beta_2 = (a,1) \wedge (c,0) \wedge (e,0) \wedge (f,0)$
AS_2	$\alpha /_{A^*_{AS_2}} = (g,1) \wedge (h,0) \wedge (i,1) \wedge (j,1) \wedge (k,0)$
ag_3	$\beta_3 = (g,1) \wedge (h,0) \wedge (i,1)$
ag_4	$\beta_4 = (h,0) \wedge (j,1) \wedge (k,0)$

Wartości funkcji $f_{ag_i}^{v_j^d}(x_i)$, gdzie $i \in \{1,2,3,4\}$, $j \in \{1,2,3\}$, przy czym

$v_1^d = 0,\ v_2^d = 1,\ v_3^d = 2$ oraz

$\forall_{i \in \{1,2,3,4\}}\ x_i \in W_{ag_i} \wedge x_i \models_{W_{ag_i}} \beta_i$

zostały przedstawione w tabeli 7.

Tabela 7

Wartości funkcji wyznaczającej największy stopień podobieństwa względem decyzji

	ag_1	ag_2	ag_3	ag_4
$v_1^d = 0$	$f_{ag_1}^0(x_1) = 2$	$f_{ag_2}^0(x_2) = 3$	$f_{ag_3}^0(x_3) = 1$	$f_{ag_4}^0(x_4) = 0$
$v_2^d = 1$	$f_{ag_1}^1(x_1) = 2$	$f_{ag_2}^1(x_2) = 3$	$f_{ag_3}^1(x_3) = 2$	$f_{ag_4}^1(x_4) = 1$
$v_3^d = 2$	$f_{ag_1}^2(x_1) = 1$	$f_{ag_2}^2(x_2) = 2$	$f_{ag_3}^2(x_3) = 3$	$f_{ag_4}^2(x_4) = 2$

Pakiety informacji, jakie otrzymają agenci syntezy AS_1 oraz AS_2, przedstawione zostały w tabeli 8.

Tabela 8

Pakiety informacji przesłane agentom syntezy

AS_1	ag_1	ag_2	Konflikt
$v_1^d = 0$	2	3	Tak
$v_2^d = 1$	2	3	Tak
$v_3^d = 2$	1	2	Nie

AS_2	ag_3	ag_4	Konflikt
$v_1^d = 0$	1	0	Tak
$v_2^d = 1$	2	1	Nie
$v_3^d = 2$	3	2	Nie

Następnie agenci syntezy wyznaczają wartości funkcji decyzyjnych dla obiektów $\overline{x}_1 \in W_{AS_1}$, $\overline{x}_2 \in W_{AS_2}$, spełniających warunki

$\overline{x}_1 \models_{W_{AS_1}} \alpha / A^*_{AS_1}$ oraz $\overline{x}_2 \models_{W_{AS_2}} \alpha / A^*_{AS_2}$.

Wartości funkcji decyzyjnych są następujące:

$\gamma_{AS_1}(\overline{x}_1) = \{v_0^d, v_1^d\}$ oraz $\gamma_{AS_2}(\overline{x}_2) = \{v_3^d\}$.

Zatem

$D = \varnothing$.

Pakiet informacji, jaki otrzyma agent menadżer, przedstawiony został w tabeli 9.

Tabela 9

Pakiet informacji przesłany agentowi menadżerowi

	AS_1	AS_2
$v_1^d = 0$	$\left(\mu_1^0(\overline{x}_1) = 5, c_1^0 = 1\right)$	$\left(\mu_2^0(\overline{x}_2) = 1, c_2^0 = 1\right)$
$v_2^d = 1$	$\left(\mu_1^1(\overline{x}_1) = 5, c_1^1 = 1\right)$	$\left(\mu_2^1(\overline{x}_2) = 3, c_2^1 = 0\right)$
$v_3^d = 2$	$\left(\mu_1^2(\overline{x}_1) = 3, c_1^2 = 0\right)$	$\left(\mu_2^2(\overline{x}_2) = 5, c_2^2 = 0\right)$

Następnie agent menadżer wyznacza współczynnik dokładności dla każdej wartości decyzji v_j^d, $j \in \{1,2,3\}$. Wyniki obliczeń podane zostały w tabeli 10.

Tabela 10
Wartości współczynnika dokładności

$v_1^d = 0$	$\mu^0(x) = \frac{6}{13}$
$v_2^d = 1$	$\mu^1(x) = \frac{8}{13}$
$v_3^d = 2$	$\mu^2(x) = \frac{8}{13}$

Zatem

$$D = \{v_2^d, v_3^d\}.$$

Ponieważ współczynnik dokładności decyzji ze zbioru D spełnia warunki zadania, więc agent menadżer sprawdza, czy w zbiorze D istnieją wartości decyzji, dla których nie powstał konflikt między agentami zasobów podczas podejmowania tej decyzji. Z uwagi na to, że podczas podejmowania decyzji v_3^d nie doszło do konfliktu pomiędzy agentami zasobów, a podczas podejmowania decyzji v_2^d powstał konflikt pomiędzy agentami ag_1 oraz ag_2, więc

$$D = \{v_3^d\}.$$

Stąd odpowiedź na zadanie jest pozytywna i wynosi $d(x) = 2$, została ona podjęta ze współczynnikiem dokładności

$$\mu(x) = \frac{8}{13} \approx 0,62.$$

5. Podsumowanie

W pracy została przedstawiona koncepcja podejmowania decyzji globalnych poprzez organizację lokalnych systemów ekspertowych w system wieloagentowy. W ten sposób możemy wyznaczyć wartość decyzji mimo sprzeczności wiedzy lokalnych systemów ekspertowych. Agenci, którzy samodzielnie nie potrafią rozwiązać problemu współpracując i wymieniając między sobą informacje, potrafią wspólnie podjąć decyzję o największym współczynniku dokładności.

Proponowana powyżej koncepcja wymaga jeszcze weryfikacji oraz przeprowadzenia badań eksperymentalnych.

LITERATURA

1. Deja R.: Conflict analysis, rough set methods and applications; new developments. In: Polkowski L. (eds.), Studies in Fussiness and Soft Computer Science, Physica-Verlag, 2000.
2. Maturana F. P., Norrie D. H.: Distributed decision-making using the contract net within a mediator architecture. Decision Support Systems, 1997, nr 20, s. 53÷64.
3. Mulawka J. J.: Systemy ekspertowe. WNT, Warszawa 1996.
4. Pawlak Z.: Rough Sets: Theoretical aspects of reasoning about data. Kluwer Academic Publishers, Boston 1991.
5. Pawlak Z., On conflicts. Int. J. of Man-Machine Studies, 1984, no. 21, s. 127÷134.
6. Pawlak Z.: An inquiry into anatomy of conflicts. Journal of Information Sciences, 1998, no. 109, s. 65÷78.
7. Po - Hsian Huang: An application of quantitative techniques to conflict resolution in a multi-agent system. Computers and Electrical Engineering, 2003, no. 29, s. 757÷779.
8. Polkowski L., Skowron A.: Rough mereology: A new paradigm for approximate reasoning. International Journal of Approximate Reasoning, 1996, no. 15, s. 333÷365.
9. Polkowski L., Skowron A.: Rough Mereological Foundations for Design, Analysis, Synthesis and Control in Distributed Systems. Information Sciences, 1998, no. 104, s. 129÷156.
10. Polkowski L., Skowron A.: Synthesis of complex objects: rough mereological approach. Proceedings of The Multi-Agent Day, Warsaw 1998.
11. Simiński R., Wakulicz-Deja A.: Circularity in Rule Knowledge Bases Detection using Decision Unit Approach. Monitoring, Security and Rescue Techniques in Multiagent System, Springer Verlag, Berlin 2005, s. 273÷279.
12. Wakulicz-Deja A.: Podstawy systemów ekspertowych. Zagadnienia implementacji. ZN Pol. Śl. Studia Informatica, Vol. 26, No. 3 (64), 2005.

Recenzent: Dr inż. Marek Sikora

Wpłynęło do Redakcji 25 października 2007 r.

Abstract

The paper presents the process of taking global decisions on the basis of the knowledge of local expert systems. The author suggests organization of local expert systems into a multi-agent system with a hierarchical structure.

The first part of the paper presents the structure of multi-agent systems and theoretical aspects of the organization of the system whereas the second part deals with the practical aspect of the suggested solution on the based on the discussion of two examples.

The first chapter establishes the main purpose of the paper.

The second chapter describes the structure of multi-agent structure. The notions of resource agent, synthesis agent and manager agent have been defined. The chapter also defines the agents' purposes and resources which are available to the agents. Also, the tools which are to be used by the agents while establishing decision value.
Fig. 1 presents a hierarchical structure of a sample multi-agent system.

The third chapter describes the scheme of taking decisions through the multi-agent system. The way of exchanging information between agents is discussed as well as the ways of solving conflicts which arise between them. All the available kinds of decisions have been presented.

The last chapter shows two examples whose aim is to establish decision value for certain objects on the basis of the knowledge of local expert systems. Fig. 2 shows the structure of the multi-agent system which is analyzed in the earlier mentioned examples. The chapter also contains a number of tables with formulas and information packets, which are sent to agents while decisions are taken.

Adresy

Alicja WAKULICZ-DEJA: Uniwersytet Śląski, Instytut Informatyki, ul. Będzińska 29, 41-200 Sosnowiec, Polska, wakulicz@us.edu.pl;
Małgorzata PRZYBYŁA-KASPEREK: Uniwersytet Śląski, Instytut Matematyki, ul. Bankowa 14, 40-007 Katowice, Polska, malgorzataprzybyla@poczta.fm.