

Katarzyna PIOTROWSKA

Politechnika Świętokrzyska, Katedra Zastosowań Informatyki

INTELLIGENTNY SYSTEM EKSPERTOWY OPARTY NA MAPACH KOGNITYWNYCH

Streszczenie. Tematem artykułu jest inteligentny system ekspertowy oparty na mapach kognitywnych (ISEMK). Opisano budowę systemu oraz przedstawiono podstawy teoretyczne oraz funkcjonalność wybranych modułów oprogramowania. Zilustrowano działanie ISEMK na przykładzie hipotetycznej ostrej mapy kognitywnej, służącej do monitorowania rozwoju ekonomicznego.

Słowa kluczowe: mapa kognitywna, inteligentny system ekspertowy

INTELLIGENT EXPERT SYSTEM BASED ON COGNITIVE MAPS

Summary. The theme of this work is intelligent expert system based on cognitive maps (ISEMK). The system construction was described. The theoretical base and functionality of the selected software modules were presented. ISEMK work was illustrated on the example of the hypothetical crisp cognitive map, that is used to monitor economic development.

Keywords: cognitive map, intelligent expert system

1. Wprowadzenie

Inteligentny system ekspertowy to oprogramowanie komputerowe, które rozwiązuje złożone problemy na podstawie wiedzy ekspertowej, w sposób zbliżony do rozumowania człowieka. Stanowi połączenie tradycyjnego systemu ekspertowego z metodami sztucznej inteligencji (sieciami neuronowymi, bankami sieci neuronowych, algorytmami genetycznymi, mapami kognitywnymi i innymi), dzięki czemu ma zdolność do doskonalenia swojego działania na podstawie zdobywanego doświadczenia i staje się narzędziem niezbędnym w przypadku niepełnej, niepewnej i trudnej do sformalizowania wiedzy [7].

Tematem artykułu jest inteligentny system ekspertowy oparty na relacyjnych mapach kognitywnych. Synteza i analiza map kognitywnych (znakowych, binarnych, ostrych, rozmytych i innych) mają dość obszerną bibliografię (na przykład [1-7 i 9-17]). Znajdują one zastosowanie w systemach wspomagania podejmowania decyzji, między innymi w dziedzinie bezpieczeństwa sieci [14], w transporcie drogowym [12] oraz w modelach społeczno-ekonomicznych [6]. Prace [3, 9] prezentują zalety wykorzystania modeli kognitywnych w predykcji szeregów czasowych. Systemy oparte na relacyjnych mapach kognitywnych są również stosowane w monitorowaniu decyzyjnym [4] oraz w kontroli złożonych procesów [17].

Głównym celem artykułu jest opracowanie inteligentnego systemu ekspertowego opartego na mapach kognitywnych (ISEMK), stanowiącego uniwersalne narzędzie do modelowania zjawisk, dla których dokładny opis matematyczny jest trudny z powodu niepełnej lub niepewnej wiedzy. Efektywność zastosowania inteligentnych systemów ekspertowych opartych na mapach kognitywnych została przedstawiona w [1 i 15]. Rozdział 2 opisuje budowę systemu ISEMK. W rozdziale 3 omówiono podstawy teoretyczne oraz funkcjonalność wybranych modułów aplikacji. W rozdziale 4 przedstawiono wyniki symulacji przeprowadzonych w opisywanym systemie. Rozdział 5 zawiera podsumowanie pracy.

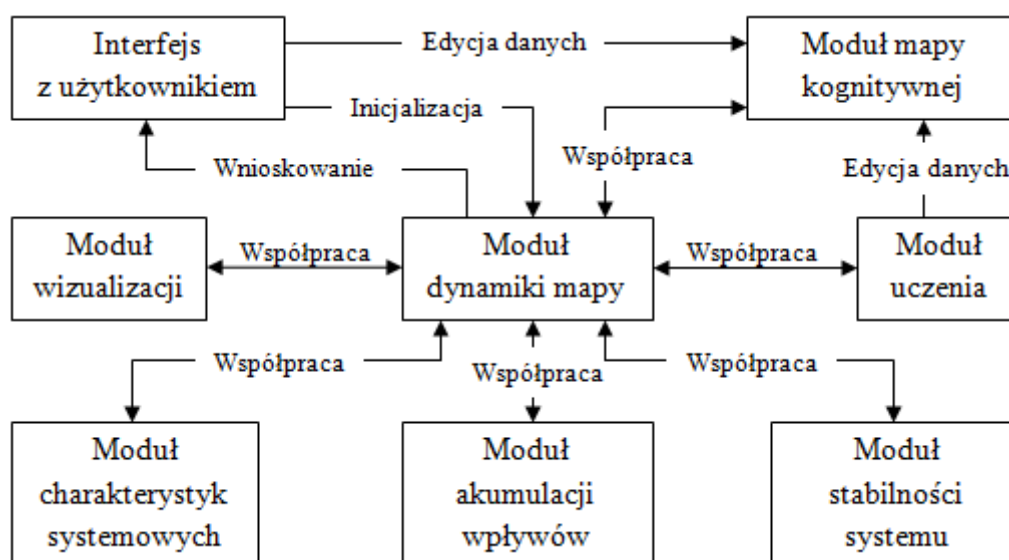
2. Budowa inteligentnego systemu ekspertowego opartego na mapach kognitywnych

System ekspertowy składa się z trzech podstawowych bloków: bazy wiedzy, maszyny wnioskującej oraz interfejsu z użytkownikiem. Relacyjna mapa kognitywna to model oparty na wybraniu istotnych dla badanego zjawiska czynników (ang. *concepts*) i określeniu powiązań między nimi [5, 7 i 14]. Mapa kognitywna odgrywa w programie rolę zarówno bazy wiedzy, jak i maszyny wnioskującej, przy czym bazę wiedzy reprezentuje zbiór czynników mapy wraz z macierzą relacji, a wnioskowanie jest związane z działaniem mapy.

ISEMK to aplikacja C# opracowana z wykorzystaniem frameworku .net 4.0. Ze względu na złożoną funkcjonalność system podzielono na następujące moduły:

- zbiór klas odpowiadających za interakcje z użytkownikiem (interfejs z użytkownikiem),
- biblioteka dll zawierająca funkcjonalność związaną z bazą wiedzy (moduł mapy kognitywnej),
- zbiór bibliotek dll tworzących maszynę wnioskującą systemu (moduł: dynamiki mapy, wizualizacji, uczenia, charakterystyk systemowych, akumulacji wpływów i stabilności systemu).

Schemat blokowy systemu ISEMK przedstawia rys. 1.



Rys. 1. Schemat blokowy ISEMK

Fig. 1. ISEMK block diagram

Uwaga

Dzięki zastosowaniu przedstawionej architektury system ISEMK jest skalowalny i w przyszłości może być rozwijany o nową funkcjonalność.

3. Wybrane moduły aplikacji ISEMK

Niniejszy rozdział zawiera podstawy teoretyczne oraz funkcjonalność wybranych modułów aplikacji ISEMK – modułu: mapy kognitywnej, dynamiki mapy, uczenia mapy oraz charakterystyk systemowych.

3.1. Moduł mapy kognitywnej

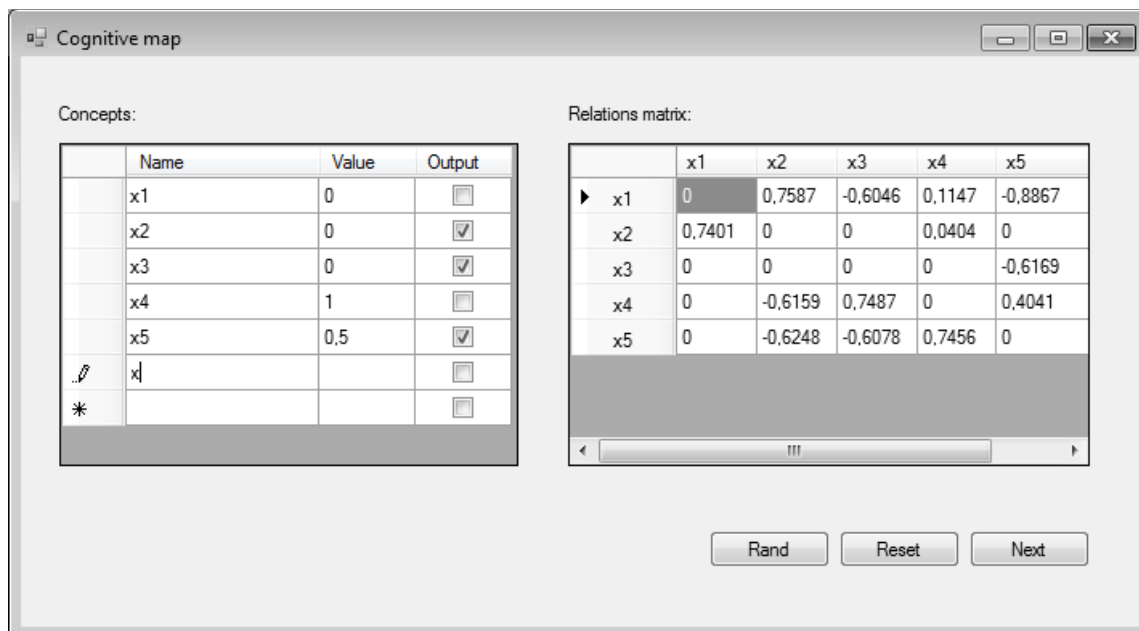
Moduł mapy kognitywnej umożliwia implementację ostrej mapy kognitywnej o dowolnym rozmiarze, której podstawę budowy stanowi graf skierowany o postaci (1) [1, 2, 5, 7, 13]:

$$\langle X, R \rangle, \quad (1)$$

gdzie: $X = [X_1, \dots, X_n]^T$ – ostre wartości czynników mapy; $R = \{r_{j,i}\}$ – macierz relacji pomiędzy czynnikami; $r_{j,i}$ – liczba z przedziału $[-1,1]$; $i, j = 1, \dots, n$; n – liczba czynników.

Budowa relacyjnej mapy kognitywnej w ISEMK sprowadza się do: wprowadzenia wiedzy ekspertowej dotyczącej badanego zjawiska, czyli określenia nazw i wartości początkowych czynników mapy, zadania powiązań między tymi czynnikami (macierz relacji) oraz

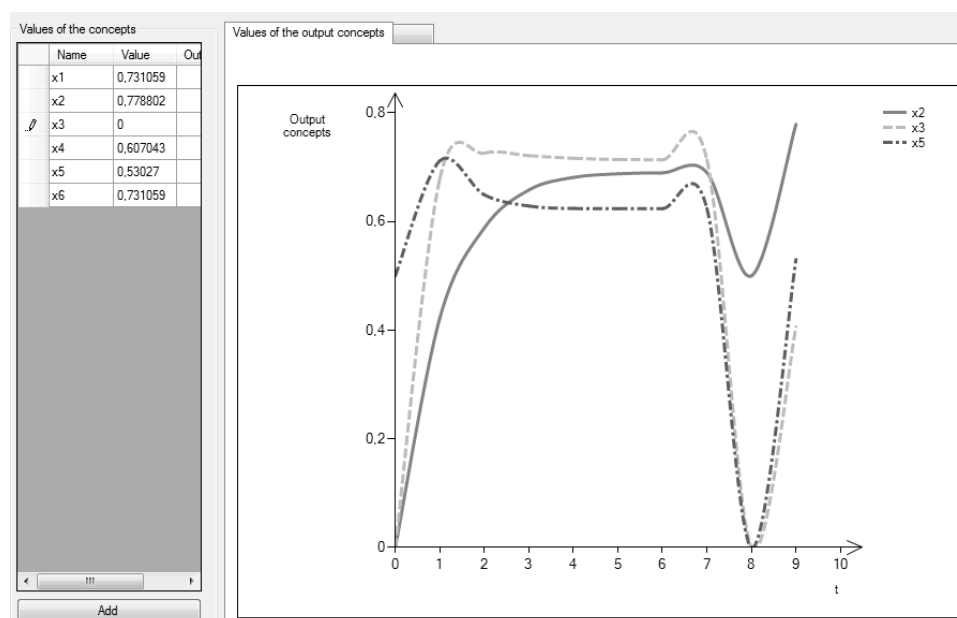
wybrania czynników wyjściowych (decydujących) systemu. Oprogramowanie umożliwia zapis oraz odczyt wprowadzonych modeli za pomocą plików xml. Formularz wprowadzania oraz edycji bazy wiedzy w ISEMK przedstawia rys. 2.



Rys. 2. Wprowadzanie / edycja bazy wiedzy w ISEMK

Fig. 2. Entering / editing the knowledge base in ISEMK

3.2. Moduł dynamiki mapy



Rys. 3. Przykład działania modułu dynamiki mapy

Fig. 3. Example of the dynamics module working

W inteligentnych systemach ekspertowych opartych na mapach kognitywnych w procesie wnioskowania duże znaczenie ma monitorowanie wartości czynników w kolejnych krokach czasu dyskretnego. Przyjęta metoda wyznaczania zmian w systemie zależy od struktury analizowanego problemu oraz od potrzeb monitorowania, określanych przez ekspertów. Obszerna bibliografia dotycząca modeli dynamiki map kognitywnych została przedstawiona między innymi w [1, 2, 4, 7, 9, 10 i 13].

Aplikacja ISEMK umożliwia edycję wartości czynników mapy oraz obserwację wpływu tych zmian na czynniki wyjściowe. Wyniki działania dynamiki mapy wyświetlane są automatycznie na wykresie oraz możliwy jest ich eksport do pliku xls. Rysunek 3 przedstawia przykładowe działanie modułu dynamiki mapy.

3.3. Moduł uczenia

Kluczowym zagadnieniem dotyczącym map kognitywnych jest ich zdolność do doskonalenia swojego działania na podstawie zdobywanego doświadczenia. Metody uczenia map kognitywnych analizowano między innymi w [2, 9, 10, 11 i 15]. W ISEMK moduł uczenia umożliwia zastosowanie gradientowej metody, polegającej na modyfikacji wartości macierzy relacji mapy w kierunku największego spadku funkcji błędu, określonej zależnością [4, 12]:

$$J(t) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (X_i(t) - Z_i(t))^2, \quad (2)$$

gdzie: $t = 0, \dots, T$; $X_i(t)$ – wartość i -tego czynnika; $Z_i(t)$ – zadana wartość i -tego czynnika; $i = 1, \dots, n$.

Uczenie macierzy relacji dla minimalizacji kryterium (7) odbywa się według zależności:

$$r_{j,i}(t+1) = r_{j,i}(t) - \eta \cdot (X_i(t) - Z_i(t)) \cdot y_{j,i}(t), \quad (3)$$

gdzie: η – współczynnik uczenia mapy; $0 < \eta < 1$; $y_{j,i}$ – funkcja czułości (ang. *sensitivity function*) wartości czynnika $X_i(t)$ na zmiany wartości relacji $r_{j,i}$ ($j = 1, \dots, n$; $j \neq i$).

Postać równań obliczających funkcję czułości $y_{j,i}$ wynika z metody gradientowej dla minimalizacji kryterium (2) i zależy od wybranego modelu dynamiki mapy. W szczególności może przyjmować postać:

$$y_{j,i}(t+1) = (y_{j,i}(t) + X_j(t)) \cdot F' \left(X_i(t) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n r_{j,i} \cdot X_j(t) \right). \quad (4)$$

Współczynnik uczenia η służy do dostosowania szybkości zmian relacji do aktualnego stanu mapy kognitywnej i maleje w miarę zbliżania się do stanu ustalonego, zgodnie z zależnością:

$$\eta(t) = \frac{\beta}{\lambda + t}, \quad (5)$$

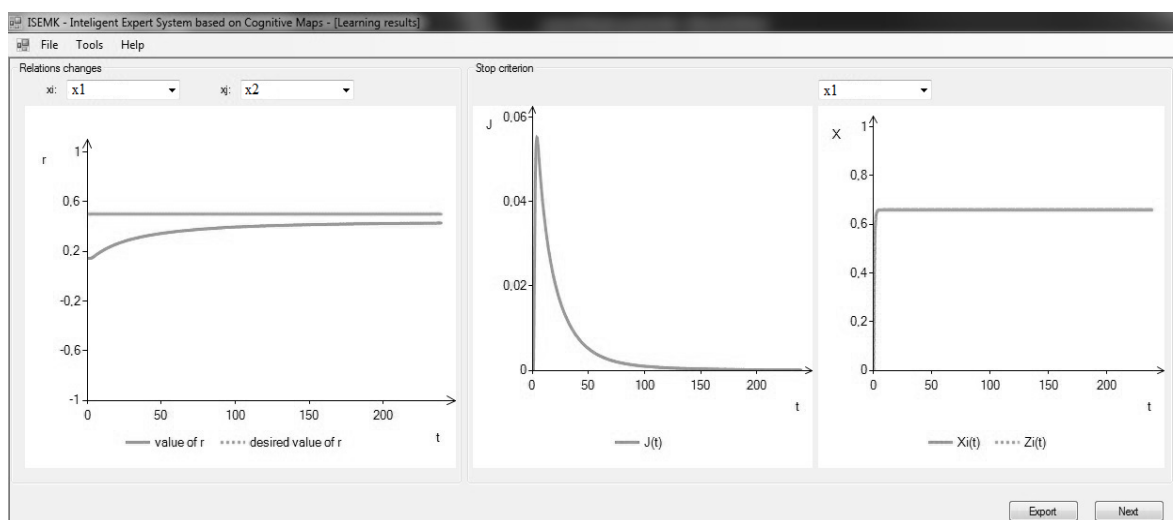
gdzie: β, λ – stałe dobrane doświadczalnie; $\beta, \lambda > 0$.

Kryterium stopu w systemie ISEMK opisuje zależność:

$$J(t) \leq e, \quad (6)$$

gdzie e – zadany poziom tolerancji błędu uczenia.

Aplikacja wyświetla wyniki działania w postaci wykresów zmian: wartości funkcji błędu, wartości macierzy relacji oraz wartości czynników. ISEMK umożliwia również eksport tych wyników do pliku xls. Rysunek 4 przedstawia wyniki uczenia uzyskane w systemie ISEMK.



Rys. 4. Przykład działania modułu uczenia
Fig. 4. Example of the learning module working

3.4. Moduł charakterystyk systemowych

Moduł charakterystyk systemowych [1 i 13] umożliwia analizę wpływu poszczególnych czynników mapy na system oraz systemu na czynniki.

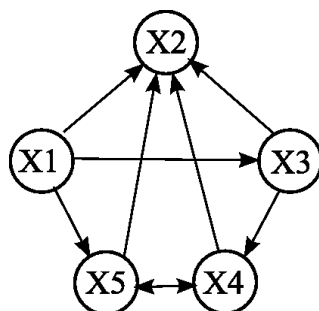
ISEMK umożliwia wyznaczenie, w postaci tabelarycznej, następujących charakterystyk systemowych: konsonansu wpływu i -tego czynnika na system (C_i), konsonansu wpływu systemu na j -ty czynnik (C_j), dysonansu wpływu i -tego czynnika na system (D_i), dysonansu wpływu systemu na j -ty czynnik (D_j), wpływu i -tego czynnika na system (P_i) oraz wpływu systemu na j -ty czynnik (P_j). Jeżeli wartości charakterystyk P_i , P_j , C_i oraz C_j dążą do 0, natomiast D_i i D_j do 1, analizowany model mapy kognitywnej jest mało adekwatny do rzeczywistego obiektu lub jego struktura nie jest optymalna.

4. Wybrane wyniki działania aplikacji ISEMK

W celu zilustrowania działania ISEMK w dalszej części przedstawiono wybrane wyniki symulacyjnego badania hipotetycznej ostrej mapy kognitywnej, służącej do monitorowania rozwoju ekonomicznego. W maszynie wnioskującej zastosowano: moduł dynamiki, uczenie systemu z wykorzystaniem metody gradientowej oraz moduł charakterystyk systemowych.

4.1. Inicjalizacja systemu

Bazę wiedzy wprowadzono do systemu ISEMK w postaci mapy kognitywnej przedstawionej na rys. 5. Jako czynniki systemu wybrano: Infrastrukturę (X1), Firmy (X2), Rozwój ekonomiczny (X3), Strategie (X4) oraz Zatrudnienie (X5).



Rys. 5. Struktura zainicjalizowanej mapy kognitywnej
 Fig. 5. Structure of the initialized cognitive map

Wartości macierzy relacji, przedstawione w tabeli 1, zostały dobrane w sposób losowy.

Tabela 1

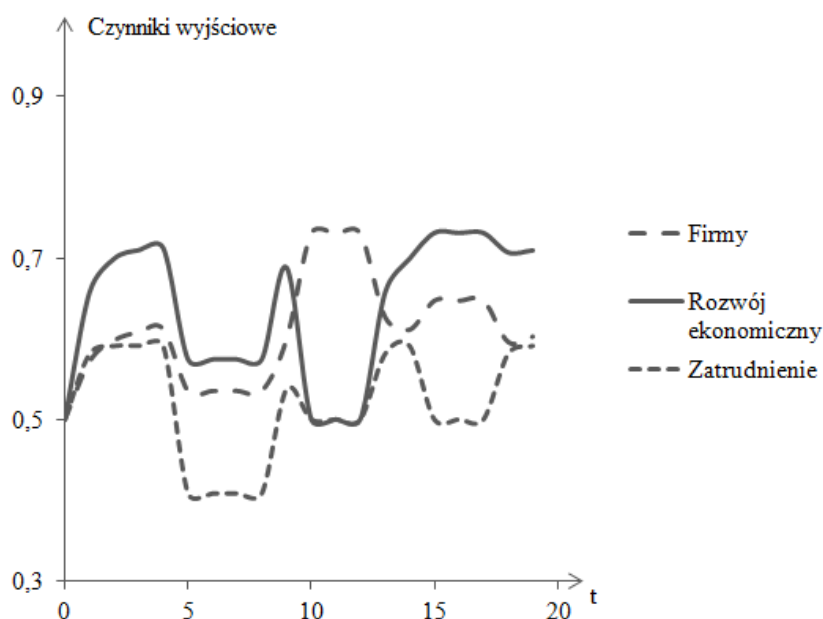
Macierz relacji dla zainicjalizowanej mapy kognitywnej

	Infrastruktura	Firmy	Rozwój ekonomiczny	Strategie	Zatrudnienie
Infrastruktura	0	0,1436	0,2991	0	-0,3707
Firmy	0	0	0	0	0
Rozwój ekonomiczny	0	-0,3909	0	0,2749	0
Strategie	0	0,6265	0	0	0,0234
Zatrudnienie	0	-0,7975	0	0,7198	0

ISEMK umożliwia monitorowanie wartości czynników wyjściowych w kolejnych krokach czasu dyskretnego. Działanie zainicjalizowanego systemu przedstawia rys. 6.

Rysunek 6 umożliwia ekspertowi analizę wpływu zmian jednych czynników mapy na pozostałe. Przykładowo spadek wartości czynnika Firmy zaskutkowało wzrostem wartości czynników: Rozwój ekonomiczny oraz Zatrudnienie.

Tabela 2 przedstawia charakterystyki systemowe, wyznaczone dla zainicjalizowanej mapy.



Rys. 6. Działanie zainicjalizowanego systemu
Fig. 6. The work of the initialized system

Tabela 2

Charakterystyki systemowe dla zainicjalizowanej mapy kognitywnej

	C_i	C_j	D_i	D_j	P_i	P_j
Infrastruktura	0,559	0	0,441	1	-0,009	0
Firmy	0	0,377	1	0,623	0	-0,053
Rozwój ekonomiczny	0,478	0,2	0,522	0,8	-0,022	0,06
Strategie	0,588	0,706	0,412	0,294	0,133	0,149
Zatrudnienie	0,456	0,798	0,544	0,202	-0,012	-0,065

Dla czynnika Infrastruktura wartość P_j jest równa 0 oraz wartość P_i dąży do 0, co może oznaczać, że model nie jest do końca adekwatny do rzeczywistego zjawiska lub jego struktura nie jest optymalna.

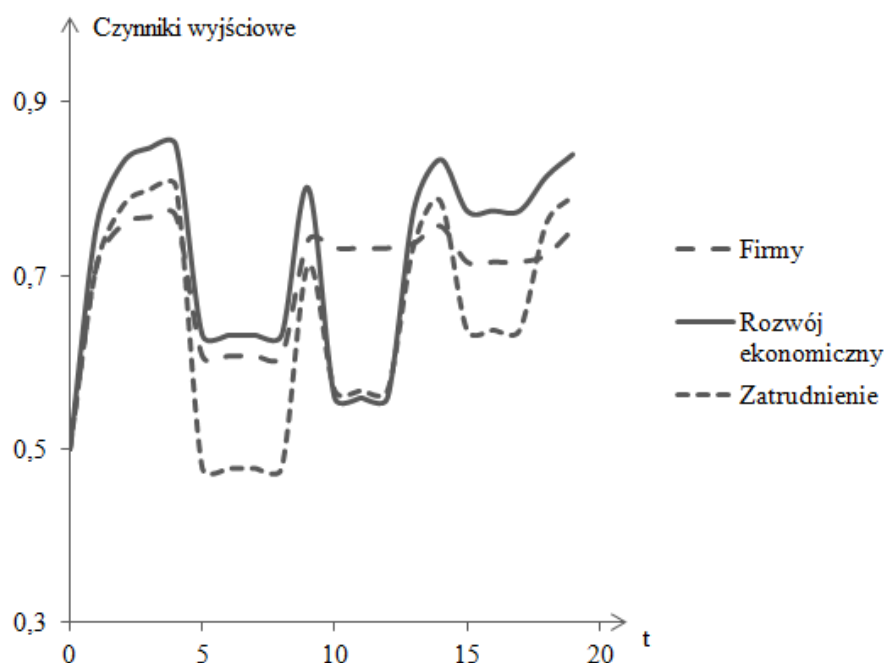
4.2. Uczenie systemu

Tabela 3

Macierz relacji dla nauczonej mapy kognitywnej

	Infrastruktura	Firmy	Rozwój ekonomiczny	Strategie	Zatrudnienie
Infrastruktura	0	0,4354	0,5394	-0,2577	-0,0921
Firmy	0	0	0,2383	-0,259	0,2695
Rozwój ekonomiczny	0	-0,0792	0	-0,0013	0,2929
Strategie	0	0,9443	0,2586	0	0,3315
Zatrudnienie	0	-0,5057	0,2397	0,458	0

Jak podkreślono w rozdziale 3.3, system ISEMK pozwala na adaptację parametrów mapy kognitywnej, co pokazano w dalszej części. W wyniku uczenia mapy poszczególne elementy macierzy relacji zmieniły wartości. Tabela 3 przedstawia macierz relacji dla nauczonej mapy kognitywnej. Działanie nauczonego systemu przedstawia rys. 7.



Rys. 7. Działanie nauczonego systemu
Fig. 7. The work of the learned system

Rysunek 7 pokazuje, że wyniki działania nauczonej mapy różnią się od przedstawionych na rys. 6. Przykładowo spadek wartości czynnika Firmy zaskutkowało spadkiem wartości czynników: Rozwój ekonomiczny oraz Zatrudnienie.

Tabela 4 przedstawia charakterystyki systemowe, wyznaczone dla nauczonej mapy.

Tabela 4

Charakterystyki systemowe dla nauczonej mapy kognitywnej

	C_i	C_j	D_i	D_j	P_i	P_j
Infrastruktura	0,243	0	0,757	1	0,198	0
Firmy	0,269	0,202	0,731	0,798	-0,03	0,127
Rozwój ekonomiczny	0,29	0,39	0,71	0,61	0,135	0,278
Strategie	0,253	0,283	0,747	0,717	0,267	-0,03
Zatrudnienie	0,219	0,399	0,781	0,601	0,083	0,278

Porównując wyniki z tabel 4 i 2, można stwierdzić, że dla czynnika Infrastruktura wartość P_j jest równa 0, co oznacza, że system nie wpływa na jego wartość, jednak charakterystyka P_i jest równa 0,198, co oznacza, że model jest bardziej adekwatny do rzeczywistego zjawiska niż przed uczeniem.

5. Podsumowanie

W artykule inteligentny system ekspertowy oparty na mapach kognitywnych (ISEMK), opisano jego budowę oraz zasadę działania. Zaprezentowano podstawy teoretyczne oraz funkcjonalność wybranych modułów oprogramowania. Przedstawiono wyniki działania ISEMK na wybranym przykładzie hipotetycznej ostrej mapy kognitywnej.

Planuje się dalsze rozwijanie oprogramowania ISEMK o możliwość implementacji:

- rozmytych map kognitywnych (opartych na odpowiednich zbiorach rozmytych i regułach wnioskowania rozmytego),
- modeli hierarchicznych,
- nowych algorytmów uczenia i oceny rezultatów analizy.

Głównym celem artykułu jest opracowanie uniwersalnego narzędzia, umożliwiającego rozwiązywanie skomplikowanych, słabo strukturalnych zadań.

BIBLIOGRAFIA

1. Borisow W. W., Krugłow W. W., Fiedułow A. C.: *Rozmyte modele i sieci*. Wydawnictwo Telekom, Moskwa 2004 (w języku rosyjskim).
2. Froelich W., Juszczuk P.: *Predictive Capabilities of Adaptive and Evolutionary Fuzzy Cognitive Maps – A Comparative Study*. *Intelligent Systems for Knowledge Management (Studies in Computational Intelligence Series)*, Vol. 252. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg 2009, s. 153÷174.
3. Hengjie S., Chunyan M., Roel W., Catthoor F.: *Implementation of Fuzzy Cognitive Maps based on Fuzzy Neural Networks and Application in Numerical prediction of Time Series*. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 18, 2010, s. 233÷250.
4. Jastriebow A., Gad S., Słoń G.: *Mapy kognitywne w monitorowaniu decyzyjnym systemów*. *Studia i Materiały Polskiego Stowarzyszenia Zarządzania Wiedzą*, nr 47, Warszawa 2011, s. 64÷77.
5. Jastriebow A., Słoń G.: *Optimization of models of fuzzy relational cognitive maps*, [in:] Jastriebow A., Raczyńska M. (eds.): *Computers in scientific and educational activity*. Institute for Sustainable Technologies – National Research Institute, Radom 2011, s. 60÷71.
6. Kandasamy W. B. V., Smarandache F., Ilanthenral K.: *Elementary Fuzzy Matrix and Fuzzy Models For Social Scientists*. Automaton, Los Angeles 2007.

7. Kosko B.: Fuzzy cognitive maps. *International Journal of Man-Machine Studies*, Vol. 24, 1986, s. 65÷75.
8. Mulawka J. J.: *Systemy ekspertowe*. WNT, Warszawa 1996.
9. Papageorgiou E. I., Froelich W.: Application of Evolutionary Fuzzy Cognitive Maps for Prediction of Pulmonary Infections. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, Vol. 16, No. 1, 2012.
10. Papageorgiou E. I., Stylios C.D.: Fuzzy Cognitive Maps, [in:] Pedrycz W., Skowron A., Kreinovich V. (eds.): *Handbook of Granular Computing*. John Wiley & Sons, Ltd, Publication Atrium, Chichester, England 2008, s. 754÷774.
11. Papageorgiou E. I., Stylios C. D., Groumpos P. P.: Active Hebbian learning algorithm to train fuzzy cognitive maps. *Internal Journal of Approximate Reasoning*, Vol. 37, 2004, s. 219÷249.
12. Piotrowska K.: Zastosowanie map kognitywnych w inteligentnych systemach wspomagania podejmowania decyzji. *Logistyka*, nr 6/2011, s. 3433÷3442.
13. Silov V. B.: Przyjęcie rozwiązań strategicznych w rozmytym otoczeniu. INPRORES, Moskwa 1995 (w języku rosyjskim).
14. Siraj A., Bridges S. M., Vaughn R. B.: Fuzzy Cognitive Maps for decision support in an intelligent intrusion detection system. *IFSA World Congress and 20th NAFIPS International Conference*, Vol. 4, 2010, s. 2165÷2170.
15. Słoń G., Jastriebow A.: Optimization and Adaptation of Dynamic Models of Fuzzy Relational Cognitive Maps, [in:] Kuznetsov S. O. et al. (eds.): *RSFDGrC 2011, Lecture Notes In Artificial Intelligence*, Vol. 6743, Springer-Verlag, Heidelberg 2011, s. 95÷102.
16. Słoń G.: Analiza wybranych algorytmów adaptacji relacji w rozmytych mapach kognitywnych. *Pomiary, Automatyka, Kontrola*, t. 56, nr 12/2010, 2010, s. 1445÷1448.
17. Stylios C. D., Groumpos P. P.: Fuzzy Cognitive Maps: a model for intelligent supervisory control system. *Computers in Industry*, Vol. 39, 1999, s. 229÷238.

Wpłynęło do Redakcji 10 stycznia 2012 r.

Abstract

Intelligent expert system integrates traditional expert system with artificial intelligence methods, in order to solve complex, imprecise tasks. The theme of this paper is intelligent expert system based on cognitive maps (ISEMK).

ISEM application, enabling the implementation of expert system based on crisp cognitive map, was developed. In chapter 2, construction of the ISEM were described. Figure 1 shows ISEM block diagram. Cognitive map plays the role of both the knowledge base, as well as the inference machine.

In chapter 3, the theoretical base and functionality of the selected software modules were presented. Cognitive map module enables the implementation of crisp cognitive map, which construction is based on directed graph in the form (1). Dynamic map module allows the analysis of dynamic impact between the concepts. Learning module uses a gradient method, consisting in modifying the relations matrix in the direction of steepest descent error function, defined by the equation (2). System characteristics module enables the analysis the impact of the individual concepts on the system, and the system on the concepts. Characteristics such as consonance (C_i, C_j), dissonance (D_i, D_j) and impact of concepts (P_i, P_j) are used.

In chapter 4, ISEM work was illustrated on the example of the hypothetical crisp cognitive map, that is used to monitor economic development. Figure 5 shows the structure of the initialized map. Figure 6 presents the work of the initialized system. Figure 7 presents the work of the learned system. Tables 1 and 3 show the relations matrix before and after learning. Tables 2 and 4 show system characteristics for initialized and learned map. The learning process influenced the change in the structure of cognitive maps and the individual system characteristics.

The works on the ISEM development will be continued.

Adres

Katarzyna PIOTROWSKA: Politechnika Świętokrzyska, Katedra Zastosowań Informatyki,
al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, Polska, k.piotrowska@tu.kielce.pl.