Alicja Wakulicz-Deja
Agnieszka Nowak-Brzezińska
Małgorzata Przybyła-Kasperek
Roman Simiński

Systemy Ekspertowe

UNIWERSYTET ŚLĄSKI
W KATOWICACH

Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT
Warszawa 2018

© Copyright by Uniwersytet Śląski w Katowicach
Katowice 2018

© Copyright by Alicja Wakulicz-Deja, Agnieszka Nowak-Brzezińska, Małgorzata Przybyła-Kasperek, Roman Simiński
Sosnowiec 2018

© Copyright by Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT
Warszawa 2018

Publikacja dofinansowana przez Uniwersytet Śląski w Katowicach.

Redakcja naukowa
Prof. dr hab. inż. Alicja Wakulicz-Deja

Redakcja techniczna
dr Agnieszka Nowak-Brzezińska
dr inż. Roman Simiński
dr Małgorzata Przybyła-Kasperek

Recenzent
Prof. dr hab. Andrzej Skowron

Wszystkie nazwy produktów są zastrzeżonymi nazwami handlowymi lub znakami towarowymi odpowiednich firm.

Powyższej monografii w całości lub części nie wolno powielać ani przekazywać w żaden sposób, nawet za pomocą nośników mechanicznych i elektronicznych (np. zapis magnetyczny), w tym też umieszczać ani rozpowszechniać w postaci cyfrowej zarówno w Internecie, jak i w sieciach lokalnych, bez uzyskania pisemnej zgody Akademickiej Oficyny Wydawniczej EXIT.

Projekt okładki
Jarosław Skowroński

Wydawca
Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT
www.exit.pl, biuro@exit.pl

ISBN 978-83-7837-062-8

Spis treści

1. Wstęp 6

2. Historia i rozwój systemów ekspertowych 9

2.1. Sztuczna inteligencja i systemy ekspertowe 9

2.2. Rozwój systemów ekspertowych 13

3. Definicja systemu ekspertowego i jego architektura 18

3.1. Ekspert a system ekspertowy 18

3.2. Architektura systemu ekspertowego 20

3.3. Właściwości i zastosowania systemów ekspertowych 23

3.4. Specyfika problemów dla systemów ekspertowych 26

4. Pozyskiwanie wiedzy od eksperta 30

4.1. Problemy pozyskiwania wiedzy 31

4.2. Dobór ekspertów 34

4.2.1. Zgodność ocen ekspertów 35

4.2.2. Przykład wyznaczenia stopnia zgodności opinii ekspertów 43

4.2.3. Badanie kompetencji zespołu ekspertów 47

4.3. Metody pozyskiwania wiedzy od ekspertów 48

4.4. Metoda delficka 49

4.4.1. Przebieg metody delfickiej 50

4.4.2. Rys historyczny metody delfickiej 53

4.4.3. Praktyczne zastosowania metody delfickiej 54

4.4.4. *Noma* lekceważoną chorobą trzeciego świata 54

4.4.5. Narzędzia wspomagające wykorzystywanie metody delfickiej 56

4.5. Podsumowanie 57

5. Regułowa reprezentacja wiedzy 58

5.1. Rodowód reprezentacji regułowej 58

5.2. Reguły jako forma zapisu wiedzy 62

5.2.1. Bazowa postać reguły 63

5.2.2. Reguły w zapisie atrybutowym 65

5.3. Przykładowa baza wiedzy 68

6. Wnioskowanie w systemach regułowych 71

6.1. Wnioskowanie a logika matematyczna 72

6.2. Podstawy procesu wnioskowania 75

6.3. Rodzaje wnioskowania w systemach regułowych 80

6.3.1. Wnioskowanie w przód 80

6.3.2. Wnioskowanie wstecz 82
6.4. Strategie doboru reguł 88
6.5. Wnioskowanie mieszane 90
6.6. RETE - szybki algorytm wnioskowania w przód 91
6.7. Podsumowanie metod wnioskowania 92

7. Rachunek zdań i predykatów 95

7.1. Definicja języka predykatów 96
7.2. Znaczenie formuł rachunku kwantyfikatorów 100
7.3. Semantyczna metoda dowodzenia sprzeczności klauzul 103
7.4. Wnioskowanie 104
7.5. Standardowa postać Skolema 106
7.6. Zasada rezolucji 108
7.7. Unifikacja 111

8. Percepty i rachunek perceptowy 114

8.1. Pojęcie perceptu i jego struktura 114
8.2. Język perceptów 117
8.3. System perceptowy jako system faktograficzny 120
8.4. Dedukcja regułowa w systemie perceptowym 121

9. Tablice decyzyjne 124

9.1. System informacyjny i tablica decyzyjna 124
9.2. Tablica decyzyjna jako baza wiedzy 127
9.3. Relacja nierozróżnialności 128
9.4. Aproksymacje zbiorów 131
9.5. Redukty i rdzeń zbioru atrybutów 134
9.6. Macierz rozróżnialności 139
9.7. Niespójność w tablicach decyzyjnych 140
9.8. Od tablicy decyzyjnej do reguł decyzyjnych 144
9.8.1. Indukcja reguł w ujęciu teorii zbiorów przybliżonych . . . 146
9.8.2. Algorytm generowania reguł decyzyjnych z dolnego przybliżenia klasy decyzyjnej 148
9.8.3. Algorytm generowania reguł z wykorzystaniem funkcji rozróżnialności 155
9.9. Automatyczne generowanie tablic decyzyjnych z reguł decyzyjnych 160

10. Ramy, scenariusze, sieci semantyczne 169

10.1. Ramy 169
10.2. Sieci semantyczne 174
10.2.1. Przykład tworzenia sieci semantycznej 177
10.2.2. Zastosowanie sieci semantycznych 178

10.3. Scenariusze 181

11. Reprezentacja wiedzy niepewnej i wnioskowanie w warunkach niepewności 183

11.1. Rozumowanie przybliżone 184

11.2. Teoria Dempstera-Shafera 186

11.3. Sieci Bayesa 191

11.3.1. Definicja sieci Bayesowskiej 193

11.3.2. Model grafowy w sieci Bayesa 194

11.4. Metoda współczynników pewności 195

11.5. Uwagi końcowe 201

12. Podsumowanie 203

Bibliografia 205

Spis rysunków 211

Spis tabel 212

1. Wstęp

Wizja myślących komputerów i rozumnie działających maszyn jest ciągle żywa w literaturze i filmach z gatunku określanego mianem fantastyki naukowej. Inspiracją tego typu twórczości nie jest tylko wyobraźnia twórców — próby stworzenia oprogramowania pozwalającego inteligentnie działać komputerom i wyposażonym weń maszynom, trwają w środowiskach naukowych od wielu lat. W połowie lat pięćdziesiątych J. McCarthy zaproponował dla tej dziedziny badań naukowych nazwę *sztuczna inteligencja* (ang. *artificial intelligence*).

Aktualnie sztuczna inteligencja jako nazwa obszaru badań naukowych ma charakter wybitnie interdyscyplinarny. Integruje dokonania naukowców z różnych dziedzin — matematyki, informatyki, biologii, nauk medycznych i społecznych. W ramach sztucznej inteligencji powstało wiele poddziedzin, często radykalnie różniących się podejściem do zagadnienia inteligencji przedmiotów nieożywionych. Wspólnym spoiwem różnych gałęzi tej dziedziny jest próba opracowania metod pozwalających działać różnorodnym maszynom w sposób rozumny i autonomiczny. Tu spotykają się naukowcy i twórcy z gatunku science-fiction — w ich wizjach komputery i sterowane przez nie urządzenia są inteligentne, zatem potrafią działać samodzielnie, podejmując racjonalne decyzje w zmieniającej się nieprzewidywalnie rzeczywistości. Jednak wizje literackie i kreacje filmowe mocno wyprzedzają aktualny stan badań naukowych. Mimo ewidentnego i praktycznie użytecznego postępu w tej dziedzinie, maszyny ciągle jeszcze nie myślą, i nie działają samodzielnie.

W literaturze można znaleźć różne rozwiązania mające na celu zautomatyzowanie sterowania i podejmowania decyzji. Zaproponowana w 1936 roku maszyna Turinga stanowiła próbę formalnego zdefiniowania sztucznej inteligencji. Perceptron, model komórki neuronowej, który został zdefiniowany w roku 1943, miał na celu przetwarzanie sygnałów. To z kolei dało początki cybernetyce — prężnie rozwijającej się nauce o systemach sterowania oraz związanych z tym przetwarzaniem informacji. Przełom lat sześćdziesiątych i siedemdziesiątych ubiegłego wieku to początki rozwoju systemów ekspertowych. Obecnie dostępne są szkieletowe systemy ekspertowe, które po wprowadzeniu do nich wiedzy z danej dziedziny mogą z powodzeniem wspierać lub zastąpić eksperta w procesie podejmowania decyzji. Jednak to nie wyczerpuje zagadnienia i nie oznacza rozwiązania wszystkich wyzwań, z którymi od pojawienia się systemów ekspertowych zmagali się ich projektanci.

Obecnie można zaobserwować szybki rozwój sztucznej inteligencji.

Zagadnienia z tego zakresu są szeroko analizowane i stosowane do różnego typu systemów. W miarę postępów w rozwiązywaniu problemów związanych ze wspomnianymi wyzwaniami doskonalone są systemy ekspertowe. Szybki rozwój technologiczny powoduje, że mamy dostęp do nowych możliwości budowy systemów, a społeczeństwo informacyjne ma coraz większe oczekiwania co do zdolności takich systemów. Oczekuje się, że systemy będą potrafiły działać w środowisku niedeterministycznym, pełnym sprzeczności, konfliktów i niepewności.

W dalszym ciągu dużym wyzwaniem jest wiedza niepewna, niepełna i niekompletna. Zaproponowano liczne podejścia pozwalające na wykorzystanie takiej wiedzy. Jednym z najistotniejszych jest, zapoczątkowana w Polsce przez Profesora Zdzisława Pawlaka, teoria zbiorów przybliżonych. Jednak konieczne są dalsze badania w tym zakresie. w praktycznych zastosowaniach bardzo istotne są również konflikty i sprzeczności, które mogą wystąpić podczas podejmowania decyzji. Do niedawna sprzeczności w procesie wnioskowania powodowały, że cały system wnioskowania był odrzucany. Obecnie proponowane są podejścia pozwalające na analizę takich sytuacji. Szczególną uwagę zwraca się na konieczność rozszerzenia rozumienia testu Turinga poprzez włączenie do zagadnień rozważanych w związku z tym testem percepcji i akcji. Laureat nagrody Turinga, Leslie Valiant zaproponował koncepcję ekorytmów. Są to algorytmy, które mają zdolności adaptacyjne i mogą odnosić się do organizmów biologicznych lub całych gatunków. Prowadzone są również badania obejmujące wnioskowanie o wzorcach zachowań. Dużym wyzwaniem jest ciągle wnioskowanie w dziedzinach o wielowymiarowych przestrzeniach cech z niepełną i niepewną informacją. Można tutaj wspomnieć o wnioskowaniu w zakresie kosmonautyki, biologii, a szczególnie macierzy DNA, czy chociażby z dziedziny bankowości i wykrywania przestępstw. Ważnym zagadnieniem jest również wnioskowanie o przyszłości na podstawie doświadczeń z przeszłości.

Wśród wielu zagadnień poruszonych w niniejszej książce, są zarówno zagadnienia związane ze specyfiką systemów ekspertowych jak i z tematyką pozyskiwania wiedzy od eksperta. W kolejnych rozdziałach dyskutowana jest problematyka zarówno regułowej jak i grafowej reprezentacji wiedzy. Tematyka związana z wnioskowaniem w systemach ekspertowych stanowi ważne zagadnienie omawiane w tej książce. Wnioskowanie wspierające rozwiązywanie konfliktów, negocjacje oraz sytuacje obarczone niepewnością są szeroko dyskutowane w kolejnych rozdziałach. Szczególną uwagę poświęcono teorii zbiorów przybliżonych, sieciom semantycznym, teorii Dempstera-Shafera i sieciom Bayesa.

Jak można zapisać wiedzę ekspercką w bazie wiedzy? Jak symulować proces rozumowania eksperta? Jak to wszystko ująć w system informatyczny, jaka winna być jego architektura, jak taki system zrealizować programowo — to są główne pytania, na jakie odpowiedzi można znaleźć w niniejszym opracowaniu. Jego celem jest przedstawienie niezbędnych postaw teoretycznych, istotnych dla budowy i funkcjonowania systemów ekspertowych, omówienie architektury systemu ekspertowego i roli jego elementów, metod pozyskiwania wiedzy od eksperta, metod reprezentacji pozyskanej wiedzy, metod wnioskowania oraz zagadnień czysto praktycznych — metod oraz narzędzi konstruowania systemów ekspertowych.

Na przestrzeni lat dokonano znaczącego postępu w rozwiązywaniu problemów związanych z procesami decyzyjnymi i systemami ekspertowymi. Jednak w dalszym ciągu opracowane metody wymagają doskonalenia a pojawiające się nowe wyzwania, związane z coraz bardziej zaawansowanymi zastosowaniami, stanowią inspirację do dalszych badań i analiz. Dlatego też tematyka wokół systemów ekspertowych poruszana w niniejszej książce jest ciągle ważna i aktualna.

Spis rysunków

3.1 Cechy eksperta i rola eksperta 19
3.2 Architektura systemu ekspertowego 22

4.1 Algorytm wyznaczania minimalnej liczby ekspertów 35
4.2 Schemat metody delfickiej 52

5.1 Graficzna ilustracja postaci reguły 63

6.1 Ilustracja koncepcji wnioskowania w przód 81
6.2 Podstawowy algorytm wnioskowania w przód 82
6.3 Ogólna koncepcja algorytmu wnioskowania wstecz 84

10.1 Hierarchia ram 173
10.2 Przykładowa sieć semantyczna „Zwierzę” 176
10.3 Przykładowa sieć semantyczna 179

Spis tabel

4.1 Oceny ekspertów z rangami niezwiązanymi 40
4.2 Oceny ekspertów z rangami wiązanymi 41
4.3 Zestawienie ocen ekspertów 44
4.4 Średnie statystyczne danej cechy 44
4.5 Zestawienie rang 45
4.6 Sumy rang ocenianych obiektów 45
4.7 Wariancja, odchylenie standardowe oraz współczynnik zmienności ocen obiektów 46

7.1 Tabela prawdy dla spójników logicznych 101
7.2 Przykład metody zero-jedynkowej 101
7.3 Przykładowe typy rezolwent 110

9.1 Przykładowy system informacyjny, objawy chorobowe 125
9.2 Przykładowy system informacyjny 130
9.3 Macierz rozróżnialności dla zbioru $B = \{b, m, t\}$ 139
9.4 Macierz rozróżnialności dla zbioru $B = \{a, b, c\}$ 140
9.5 Niespójna tablica decyzyjna 141
9.6 Tablica decyzyjna po usunięciu niespójności 143
9.7 Tablica decyzyjna z uogólnionym atrybutem decyzyjnym 143
9.8 Tablica decyzyjna, algorytm generowania reguł decyzyjnych 149
9.9 Wejściowa tablica decyzyjna 156
9.10 Tablica decyzyjna po usunięciu niespójności 157
9.11 Tablica decyzyjna po usunięciu redundancji 157
9.12 Macierz rozróżnialności $M(C)$ 157
9.13 Uogólniona macierz rozróżnialności $MG(A, \{0\}, x_1)$ 158
9.14 Uogólniona macierz rozróżnialności $MG(A, \{1\}, x_2)$ 159
9.15 Uogólniona macierz rozróżnialności $MG(A, \{1\}, x_4)$ 159
9.16 Algorytm generowania tablicy decyzyjnej z reguł, krok 1 163
9.17 Algorytm generowania tablicy decyzyjnej z reguł, krok 2 164
9.18 Algorytm generowania tablicy decyzyjnej z reguł, krok 3 164
9.19 Algorytm generowania tablicy decyzyjnej z reguł, kroki 4–5 165
9.20 Algorytm generowania tablicy decyzyjnej z reguł, usuwanie niespójności 165
9.21 Algorytm generowania tablicy decyzyjnej z reguł, krok 6 166
9.22 Algorytm generowania tablicy decyzyjnej z reguł, usuwanie atrybutu oraz obiektów nadwymiarowych 166
9.23 Algorytm generowania tablicy decyzyjnej z reguł, krok 8 167
9.24 Algorytm generowania tablicy decyzyjnej z reguł, ostateczna postać tablicy decyzyjnej 168