

Marek VALENTA, Andrzej ZĄBEK, Aleksander MAZGAJ
Katedra Informatyki, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
Oddział Kliniczny Elektrokardiologii, Krakowski Szpital Specjalistyczny
im. Jana Pawła II w Krakowie

ROLA METAWIEDZY DZIEDZINOWEJ W STEROWANIU PROCESEM DIAGNOSTYCZNYM OPARTYM NA WNOSKOWANIU TYPU NAIVE BAYES

Streszczenie. Artykuł, na przykładzie systemu diagnostycznego, opartego na probabilistycznej bazie wiedzy i wnioskowaniu typu naive bayes, analizuje problem nie-dopasowania toku rozumowania systemu do ciągu myślowego eksperta i proponuje rozwiązanie oparte na rozszerzeniu podstawowej bazy wiedzy o specjalizowaną metawiedzę zależną dziedzinowo. Ocena rozwiązania problemu prezentowana jest na podstawie stworzonego systemu z bazą wiedzy, dedykowaną rozpoznawaniu typów nadciśnienia tętniczego.

Słowa kluczowe: systemy ekspertowe, bazy wiedzy, metawiedza, wnioskowanie NBC, proces diagnostyczny, nadciśnienie tętnicze

THE ROLE OF DOMAIN DEPENDED META-KNOWLEDGE IN CONTROLLING THE DIAGNOSTIC PROCESS BASED ON NAIVE BAYES INFERENCE

Summary. The article uses an example of a diagnostic system based on a probabilistic knowledge base and Naïve Bayes Classifier inference, analyzing mismatch characteristic of the system's reasoning and an expert's reasoning to show the solution extending basic knowledge base with specialized, domain-dependent meta-knowledge. The evaluation of the solution is represented by the expert system dedicated to recognition of hypertension.

Keywords: Expert systems, knowledge bases, meta-knowledge, NBC inference, diagnostic process, hypertension

1. Systemy z wiedzą probabilistyczną

1.1. Wprowadzenie

Systemy ekspertowe stanowią narzędzie zastępujące lub wspomagające decyzje ekspertów, generując lub sugerując ewentualne rozwiązania w dziedzinie, dla której zostały stworzone. Postawione im zadanie systemy te powinny wykonywać tak dobrze, jak człowiek będący ekspertem w dziedzinie, której to zadanie dotyczy. Znanych jest wiele uznanych sposobów i technik realizacji takich systemów. Od zdecydowanej większości z nich wymagane jest aby uwzględniały częstą, naturalną niepewność zarówno dostępnej wiedzy dziedziny, jak i wyników ich ekspertyzy.

Uznaje się, że prawdopodobieństwo może służyć nie tylko jako podstawa dla wyrażania hipotetycznej wiedzy o występujących w świecie regularnościach, ale może być też miarą przypisywaną nie tyle samym zdarzeniom i sytuacjom, co naszym sądom o tych zdarzeniach i sytuacjach. Prawdopodobieństwo subiektywne wyrażać zatem może przekonanie wydającego opinię o jej prawdziwości. Wydaje się też [1], że nieodłącznie do zestawu najważniejszych metod myślenia i przewidywania przez ludzi, a w tym także przez ekspertów, należy zasada indukcji, będąca podstawową metodą uogólniania dostatecznie licznych i regularnych obserwacji oraz zdarzeń, a następnie szacowania na ich podstawie prawdopodobieństw różnych zdarzeń i sytuacji.

W wielu systemach ekspertowych często wykorzystuje się powyższe spostrzeżenia budując probabilistyczne bazy wiedzy, w których (na podstawie informacji trenującej) szacowane są prawdopodobieństwa dotyczące właściwości interesującej nas dziedziny, a kolejno, na ich podstawie, z wykorzystaniem probabilistycznych mechanizmów wnioskowania, przypisywane są prawdopodobieństwa interesujących nas hipotez.

Z uwagi na powyższe wnioskować by można, że cały proces rozumowania probabilistycznych systemów ekspertowych przypomina w jakimś sensie naturalny sposób rozumowania eksperta. Niestety tak nie jest i to nie tylko dlatego, że podstawowy proces wnioskowania realizowany jest przez precyzyjnie określony algorytm obliczeniowy, ale dlatego, że całość systemowego procesu dochodzenia do prawidłowych wniosków końcowych najczęściej nie jest zgodna ze stosowanym przez ekspertów sposobem dochodzenia do wyniku ekspertyzy. Dzieje się tak dlatego, że zawartość podstawowej bazy wiedzy to za mało, aby procesowi wnioskowania systemu nadać tryb bardziej naturalny, wynikający z faktu uwzględniania przez ekspertów dodatkowej wiedzy.

Artykuł koncentruje się na dyskusji i propozycjach rozwiązań, które w pewnych konkretnych, probabilistycznych systemach ekspertowych pozwolą zdecydowanie zwiększyć stopień dopasowania procesu wnioskowania systemu do pożądanego modelowego sposobu postępowania eksper-

ta. Dyskusja i proponowane rozwiązania dotyczą rozszerzenia funkcjonalności szkieletowego systemu ekspertowego BayEx¹ [9, 10, 11], dają się jednak uogólnić na całą klasę tego typu systemów.

1.2. Szkieletowy system ekspertowy BayEx

BayEx jest szkieletowym systemem ekspertowym (ang. shell), budowanym na podstawie probabilistycznej bazy wiedzy, wykorzystywanej przez mechanizm wnioskowania oparty na twierdzeniu Bayesa, a znany jako naiwny klasyfikator bayesowski (NBC – Naive Bayes Classifier). Baza wiedzy obejmuje całą przestrzeń interesujących zdarzeń, opisujących dziedzinę zastosowania systemu ekspertowego. Wyróżnić w niej można zdarzenia obserwowalne w rzeczywistości, nazywane dalej symptomami oraz zdarzenia zaliczane do podzbioru stanowiącego przestrzeń możliwych hipotez. Hipotezy h_j pozostają w relacjach z określonymi symptomami s_i , a relacjom tym przypisywane są prawdopodobieństwa warunkowe (a posteriori) $P_{ij}(s_i|h_j)$ obserwacji symptomu s_i przy poprawności hipotezy h_j . W bazie wiedzy wszystkim hipotezom przypisane są także aprioryczne prawdopodobieństwa (a priori) $P_A(h_j)$ ich występowania [2].

W szeroko znanym i stosowanym podejściu dla konstrukcji procesu wnioskowania określonym mianem naiwnego klasyfikatora bayesowskiego, algorytm motoru wnioskowania jest w stanie, przy znanej informacji dotyczącej występowania lub nie występowania w rzeczywistości zdarzeń-symptomów, określić końcowe (a posteriori) wartości prawdopodobieństwa poprawności hipotez tylko w przypadku nałożenia na dziedzinę wiedzy i jej reprezentację dodatkowych warunków. Warunki te wymagają aby na przestrzeń hipotez składała się skończona ich liczba, aby wyczerpywały wszystkie możliwości, parami się wykluczały oraz aby symptomy były od siebie warunkowo niezależne (względem hipotez) [2]. Jest to niewątpliwie duże ograniczenie zastosowania tej metody reprezentacji wiedzy wnioskowania, ale liczne zastosowania potwierdzają nie tylko jej znaczną przydatność, ale i stosunkowo dużą, praktyczną tolerancję na pewne uchybienia w przestrzeganiu powyższych założeń [1].

Dużym plusem powyższych rozwiązań jest względna prostota bazy wiedzy i stosunkowo łatwy sposób jej pozyskiwania zarówno na podstawie wiedzy heurystycznej ekspertów, podstawowych badań statystycznych baz danych dziedziny, jak i wykorzystywania procedur uczenia maszynowego, dostępnych dla tego typu reprezentacji wiedzy.

Zasadniczym zadaniem systemów ekspertowych powyższego typu jest wyznaczenie wartości prawdopodobieństw końcowych wszystkich hipotez (najczęściej nie tylko ich uszeregowanie z podaniem względnych wartości tego uszeregowania). Wartości te stanowią bowiem wspomniane już subiektywne przekonanie systemu o prawdziwości każdej z hipotez,

¹ System stworzony w Katedrze Informatyki AGH; od pewnego czasu wykorzystywany w badaniach i dydaktyce

opartym na jej uprawdopodobnieniu przez zaobserwowane symptomy. Szerszą informację na temat zasad funkcjonowania tego typu systemów znaleźć można w [9, 10 i 11].

1.3. Ekspertyza systemu i eksperta

Ogólnie od poprawnie zdefiniowanych systemów szkieletowych wymagane jest aby ekspresja języka definiowania bazy wiedzy umożliwiała takie jej modelowanie, które pozwala na jak najlepsze przeprowadzenie procesu wnioskowania i uzyskanie wysokiej wiarygodności wyniku ekspertyzy. Poprawność wiedzy i podstawowy sposób wnioskowania zapewnia tę wiarygodność. Dla dalszych rozważań kluczowe znaczenie ma rozumienie słowa *najlepsze*. Autorzy zakładają, że *najlepsze* to takie, które pozwala w jak najszerszym zakresie przybliżyć proces dochodzenia systemu do końcowego rezultatu, do procesu realizowanego przez ekspertów. Nie definiuje się tutaj miary zgodności tych procesów, pozostawiając to subiektywnej ocenie, ale pragnie się wskazać na elementy, które są istotne dla tej zgodności.

Zastosowanie jednej z najprostszych metod uczenia, jaką jest obserwacja eksperta podczas ekspertyzy ewidentnie pokazuje, że eksperci oprócz wiedzy probabilistycznej o charakterze dającym się reprezentować w przedstawianej powyżej postaci, dysponują i używają (podczas ekspertyzy) dodatkowej, rozległej wiedzy merytorycznej i doświadczenia, które istotnie wpływają na tok realizacji ich ekspertyz [8]. Ponieważ może to być różnie uwzględniane w odmiennych systemach dziedzinowych, dalsze rozważania prowadzone były dla dziedziny diagnostyki ogólnej w środowisku medycznym, także ze względu na wiedzę ekspercką jednego z autorów. Proponowane rozwiązania pozwolą doświadczonym inżynierom wiedzy zastosować je także w innych dziedzinowych zastosowaniach systemu szkieletowego BayEx oraz systemów podobnych.

Konkludując, aby motor wnioskowania tworzonego systemu ekspertowego realizował proces wnioskowania z NBC tak, aby był on zbliżony do procesu ekspertów, jego konstrukcja musi pozwolić na realizację dodatkowych funkcjonalności, pozwalających na wybór charakteru realizowanych zadań oraz na umożliwienie dopasowania toku rozumowania systemu do jakiś ogólniejszych reguł, stosowanych przez ekspertów w danej dziedzinie. Określenie „w danej dziedzinie” słusznie sugeruje, że tok rozumowania realizowany przez motor wnioskowania powinien się zmieniać w zależności od dziedziny zastosowania systemu, ale w systemie szkieletowym sposób reprezentacji tej wiedzy powinien być jednolity.

Zatem, także motor wnioskowania systemu musi być wyposażony w dodatkowe algorytmy sterowania przebiegiem ekspertyzy, a dla dopasowania ich do dziedziny zastosowania systemu w bazie wiedzy musi pojawić się dodatkowa wiedza sterująca tymi procesami – dziedzinowa metawiedza. Ta metawiedza definiowana każdorazowo na etapie tworzenia sys-

temu przez eksperta lub inżyniera wiedzy w systemach szkieletowych musi mieć jednak przewidzianą z góry i zdefiniowaną strukturę.

W teorii i praktyce systemów ekspertowych metoda rozwiązywania postawionego problemu za pomocą metawiedzy jest szeroko stosowana i przyjmuje bardzo różny charakter. Prostą jej postać, pozwalającą w procesie rozumowania systemu uwzględniać koszt pozyskania potrzebnej informacji, można spotkać np. w GeNIe – systemie z wiedzą w postaci sieci bayesa [3]. Jej znacznie bardziej złożoną jej postać można obserwować np. w bardziej nowatorskich rozwiązaniach systemów ekspertowych, których wiedza i wnioskowanie bazują na logice wiarygodnego rozumowania [7].

1.4. Wartości diagnostyczne symptomów

Analizując konieczność dopasowania toku rozumowania systemu wnioskującego, opierającego się na NBC do rzeczywistego, modelowego, typowego medycznego procesu diagnostycznego zwrócono przede wszystkim uwagę na przebieg dialogu systemu z użytkownikiem. Proces realizacji pozyskiwania przez system informacji o faktach obserwowanych przez użytkownika systemu (najczęściej lekarza, ale niekoniecznie), a będących z punktu widzenia systemu symptomami, staje się kluczowym elementem w procesie dopasowywania systemu do potrzeb diagnostyki w środowisku medycznym.

W klasycznym rozwiązaniu problemu wyznaczania kolejności pozyskiwania przez system informacji o obserwowaniu występowania (lub nie występowania) symptomów ważną rolę odgrywają tak zwane wartości diagnostyczne symptomów. Dla symptomów, o których występowaniu system nie ma jeszcze informacji, wartości te najczęściej wyznaczane są na podstawie informacji zależnej, jaką niesie znajomość faktu występowania (lub nie występowania) zdarzenia-symptomu, ustalonej na podstawie miary, jaka wyznaczana jest na podstawie:

$$w(s_i) = \sum_Z |P_{biez}(h_z | s_i) - P_{biez}(h_z | \sim s_i)|, \quad (1)$$

gdzie: $w(s_i)$ jest miarą wartości diagnostycznej symptomu s_i , Z reprezentuje podzbiór hipotez h_z powiązanych z symptomem s_i , a $P_{biez}(h_z | s_i)$ oraz $P_{biez}(h_z | \sim s_i)$ to odpowiednio bieżące prawdopodobieństwa aprioryczne, wynikające z przyjęcia występowania oraz niewystępowania faktu – symptomu s_i .

Ten sposób wyznaczania wartości diagnostycznej symptomu ma wiele pożądanых cech. Uwzględnia bowiem, oprócz całej wiedzy dziedzinowej zawartej w „statycznej” bazie wiedzy, także aktualny, dynamicznie zmieniający się stan wiedzy systemu, dotyczący prawdopodobieństw bieżących hipotez, a ustalany na podstawie uzyskanych już informacji o symptomach.

Taki sposób wyznaczania wartości diagnostycznej symptomów uwzględnia tylko aspekty pragmatyczne informacji o symptomach. Nie uwzględnia natomiast aspektów semantycznych

tych informacji, które mają zasadniczy wpływ na tok ekspertyzy, z punktu widzenia pożądanej wg ekspertów kolejności pozyskiwania informacji o symptomach.

Analiza rzeczywistej wiedzy eksperta lekarza-diagnosy pozwoliła ustalić wiele uwarunkowań, które przez tradycyjny system BayEx nie są brane pod uwagę przy wyznaczaniu wartości diagnostycznej symptomów z powodu braku takiej wiedzy w bazie wiedzy systemu oraz procedur uwzględniających ją w procesie wnioskowania. W koncepcji autorów taka dodatkowa wiedza powinna być elementem metawiedzy systemu. Konieczne jest zatem zdefiniowanie tej metawiedzy i znalezienie takiej formy jej reprezentacji, która zapewni jej maksymalną elastyczność i uniwersalność w definiowaniu różnego typu wiedzy, uwzględnianej dodatkowo przez ekspertów.

2. Koncepcja i projekt rozszerzenia bazy wiedzy systemu

2.1. Dodatkowe uwarunkowania procesu diagnostycznego ekspertów

Analiza rzeczywistych procesów diagnostyki ogólnej w zakresie medycyny pozwala ustalić co najmniej kilka dodatkowych aspektów wpływających na kolejność pozyskiwania informacji o obserwowanych symptomach. Przez obserwowane symptomy rozumiane są takie, których występowanie lub niewystępowanie u pacjenta daje się stwierdzić poprzez: obserwację, wywiad, fizykalne badanie lekarskie oraz znajomość wyników różnego typu badań (laboratoryjnych i diagnostycznych). Analiza modelowej kolejności pozyskiwania informacji o symptomach wykazuje dużą różnorodność w zależności od dziedziny ekspertyzy, ale np. w zakresie diagnostyki ogólnej pozwala na ustalenie kilku szczegółowych uwarunkowań, mających istotny, dodatkowy wpływ na wartość diagnostyczną symptomów.

Przykładowymi, ważnymi i uniwersalnymi uwarunkowaniami jakie bierze pod uwagę lekarz diagnosta są: inwazyjność procedur diagnostycznych, pozwalających na uzyskanie informacji o występowaniu symptomu, czas potrzebny na realizację procedur, koniecznych do uzyskania takich informacji oraz koszt finansowy ich uzyskania.

Inwazyjność procedur diagnostycznych, znana ekspertom, pozwala im na takie ustalanie kolejności zlecenia wykonania procedur, aby zapewnić maksymalne bezpieczeństwo pacjenta i nie narażanie go na niekonieczne, a możliwe powikłania. W toku procesu diagnostycznego, ze względu na konieczność dopasowania czasu uzyskania diagnozy do sytuacji klinicznej wymagane jest uwzględnienie przez lekarza czasu uzyskiwania informacji o symptomie. W praktyce, niestety nie do pominięcia przez lekarza są też znane mu aspekty finansowe realizacji badań niosących informację o konkretnych symptomach. W systemach dedykowanych różnym dziedzinom może wystąpić konieczność brania pod uwagę innych i większej liczby uwarunkowań.

Lekarz w codziennej praktyce musi godzić znane mu tego typu uwarunkowania wyznaczając, w zależności od sytuacji klinicznej, definiującej nadrzędny cel, jednolitą sumaryczną miarę wyznaczającą wartość diagnostyczną każdego z symptomów. Sumaryczną bo uwzględniającą nie tylko, stosunkowo łatwy do zdefiniowania, indywidualny wpływ branych pod uwagę uwarunkowań na wartość diagnostyczną każdego z symptomów, ale sumę wpływu tych uwarunkowań. Wartość tej sumarycznej miary określanej jako umowny koszt uzyskania informacji o symptomie, która ze swojej natury ma charakter statyczny (niezmienny w czasie ekspertyzy), podczas ekspertyzy powinna być (z oczywistych względów) brana pod uwagę łącznie z wartością miary wartości diagnostycznej symptomu, wyznaczonej „dynamicznie” wg wzoru (1).

Postać miary statycznej musi być definiowalna w wiedzy dziedzinowej łącznie z umożliwieniem definiowania kilku jej postaci. Użytkownikom końcowym systemu ma to umożliwić elastyczny wybór preferowanej, zależnej od sytuacji, strategii ustalania statycznej wartości diagnostycznej symptomów.

Postaci miary kosztowności statycznej poszczególnych symptomów powinny odzwierciedlać różne sytuacje, z jakimi użytkownik może spotkać się w swojej praktyce, wykorzystując system ekspertowy dla wspomaganie swoich decyzji.

Kończąc definiowanie wymogów dla uwzględnienia dodatkowej wiedzy systemu, dotyczącej aspektów kosztowych pozyskania informacji o symptomie, konieczne wspomnieć należy, że patrząc globalnie na cały przebieg ekspertyzy istotnym elementem jej dostosowania do rzeczywistości jest konieczność ustalenia warunku końca ciągu pytań systemu o występowanie symptomów. W wersji podstawowej systemu BayEx jest już zdefiniowany i realizowany warunek końca ekspertyzy, zasadzający się na komunikowaniu przez system faktu osiągnięcia przez pierwszą lub kolejne hipotezy prawdopodobieństwa bieżącego, plasującego daną hipotezę na pierwszym lub kolejnych miejscach listy hipotez, uporządkowanej wg ich prawdopodobieństwa końcowego.

2.2. Postać metawiedzy systemu

Analiza rzeczywistej wiedzy eksperta lekarza diagnosty pozwoliła ustalić wiele uwarunkowań, które nie są brane pod uwagę przy wyznaczaniu wartości diagnostycznej symptomów z powodów oczywistych – braku takiej wiedzy w bazie wiedzy systemu. W koncepcji autorów taka dodatkowa wiedza powinna być elementem metawiedzy systemu, obok istniejących już jej elementów, ale odnoszących się do innych aspektów sterowania dialogiem z użytkownikiem. Konieczne jest jednak jej zdefiniowanie i znalezienie takiej formy jej reprezentacji, aby zapewnić jej maksymalną elastyczność i uniwersalność.

W projekcie (uwzględniając wyniki powyższej analizy) przyjęto następujący sposób wykorzystania wszystkich, możliwych, dodatkowych uwarunkowań oraz różnych postaci miary statycznej kosztowności informacji o symptomach, rozumianych jak powyżej.

Cała wiedza systemu, potrzebna do dodatkowego sterowania przebiegiem ekspertyzy, jest uznana za element metawiedzy systemu. Z kolei motor wnioskowania jest rozbudowany o procedury wyznaczania wartości diagnostycznej symptomu na podstawie tradycyjnej wiedzy i metawiedzy systemu, czyli z uwzględnieniem kosztu statycznego pozyskania informacji o symptomie oraz predefiniowanych przez ekspertów funkcji celu. Wybór funkcji celu dokonywany jest przez użytkowników systemu w trakcie inicjacji ekspertyzy, w zależności od bieżącej sytuacji klinicznej i przyjętej strategii diagnostycznej.

2.2.1. Wiedza o uwarunkowaniach

Każdy obecny w bazie wiedzy symptom ma dodatkowe atrybuty, które przypisane są zdefiniowanym uwarunkowaniom. Wartości tych atrybutów oddają wiedzę eksperta, mającą za cel uporządkować symptomy w kolejności wg kosztu uzyskania informacji o symptomie, w ramach zdefiniowanego uwarunkowania.

Wartości atrybutów przypisywane przez eksperta poszczególnym symptomom są wartościami liczbowymi dodatnimi, odpowiadającymi wiedzy eksperta na ich temat. W części przypadków mogą to być wartości zaobserwowane bezpośrednio w dziedzinie wiedzy systemu (np. koszt badania), ale często będą odwzorowywały przekonanie eksperta o rozumianym symbolicznie koszcie uzyskania informacji o wystąpieniu symptomu (np. inwazyjność badania). W celu ujednoczenia wartości tych atrybutów, umożliwiających ich dalsze uwzględnianie w procedurach ustalających sumaryczną miarę kosztów uzyskania informacji o symptomie, dla każdego uwarunkowania dokonywana jest normalizacja wartości atrybutów do przedziału $(0, 1]$.

2.2.2. Funkcje celu

Normalizacja wartości atrybutów odpowiadających uwarunkowaniom ma na celu przygotowanie wartości uwarunkowań zawartych w *metawiedzy* do kolejnego etapu ich przetwarzania, pozwalającego na stworzenie miary będącej sumaryczną wartością szeroko rozumianego kosztu pozyskania informacji o każdym z symptomów. Tworząc tę miarę należy wziąć pod uwagę fakt, że nie wszystkie uwarunkowania mają jednakowe znaczenie dla lekarza realizującego proces diagnostyczny. Dlatego umowna wartość sumarycznej miary kosztów uwzględnia ten fakt, pozwalając ekspertowi w metawiedzy dziedziny zdefiniować wagi dla tych uwarunkowań. Przyjęto, że wartości tych wag zawierają się w przedziale $[-1, +1]$. Należy zauważyć możliwość definiowania ekstremalnie różnego wpływu uwarunkowań na sumaryczną wartość kosztów.

Ostatecznie system ustala tę wartość na podstawie wzoru:

$$k(s_i) = \sum_{z=1}^m A_{iz} * W_z, \quad (2)$$

gdzie: $k(s_i)$ to sumaryczna wartość kosztów symptomu s_i , A_{iz} oznacza znormalizowaną wartość uwarunkowania z przypisaną symptomowi s_i , a W_z to wartość wagi przypisanej uwarunkowaniu z .

Celem uzyskania możliwości pewnej interpretacji roli tak ustalanego kosztu w wyznaczeniu końcowej, sumarycznej wartości diagnostycznej symptomów zakłada się normalizację tej wartości poprzez przemnożenie jej przez wartość $1/m$, gdzie m jest liczbą występujących w funkcji celu uwarunkowań.

Mogłoby się wydawać, że w przyjętym rozwiązaniu ostateczna wartość diagnostyczna symptomu ($w_{total}(s_i)$) może realizować założoną przez eksperta strategię pozyskiwania informacji o symptomach, poprzez jej ustalenie na podstawie wzoru:

$$w_{total}(s_i) = w(s_i) - C * \frac{1}{m} * k(s_i), \quad (3)$$

gdzie: $w(s_i)$ to dynamicznie wyznaczana wartość diagnostyczna symptomu na podstawie wzoru (1), a C to kolejna waga – waga sumarycznego kosztu, mogąca przyjmować wartości z przedziału $[0, 1]$, a pozwalająca na definiowanie roli wpływu czynnika kosztów na ostateczną wartość diagnostyczną wszystkich symptomów $w_{total}(s_i)$.

Jednak należy zauważyć, że wpływ składnika statycznego kosztów, pomimo jego regulowania wagą C , jest niezmienny w trakcie trwania procesu diagnostycznego. Prowadzić to może do zachowań systemu, początkowo wskazujących na pewną dominację w ostatecznej wartości diagnostycznej symptomu składnika dynamicznego, a w końcowej fazie rozumowania składnika statycznego. W celu niedopuszczenia do takiej sytuacji, system musi przewidywać także możliwość pewnego zrelatywizowania składnika stałego, poprzez uzależnienie go od dynamicznie zmiennej wartości $w(s_i)$. Uwzględnieniem tego postulatu jest przyjęcie, że ostateczna wartość diagnostyczna symptomu określana jest na podstawie wzoru (4):

$$w_{total}(s_i) = w(s_i) * (1 - C * \frac{1}{m} * k(s_i)). \quad (4)$$

Wagi W_z , przypisywane każdemu z uwarunkowań, odzwierciedlają przekonanie eksperta o wpływie każdego z uwarunkowań na sumaryczny koszt uzyskania informacji o symptomie. Przyjęcie założenia o możliwości przypisywania tym wartościom zarówno wartości ujemnych, jak i dodatnich rozszerza możliwości eksperta o sygnalizowanie faktu, że uwarunkowanie może podwyższać lub obniżać (traktowaną symbolicznie) sumaryczną wartość kosztów. Dla każdego symptomu jest to wartość o charakterze statycznym, czyli jest niezmienna w trakcie procesu wnioskowania. Inną rolę w metawiedzy spełnia waga C , która ma decydujący wpływ na stopień uwzględnienia statycznych wartości kosztów w ich kooperacji z wartością diagnostyczną symp-

tomu $w(s_i)$, mającą charakter dynamiczny, zmienny w trakcie procesu diagnostycznego. Wagi W_z oraz waga C łącznie pozwalają ekspertom na predefiniowanie w systemie wielu funkcji celów, które odpowiadają różnym strategiom wnioskowania eksperta i są związane z sytuacyjną koniecznością uwzględniania różnych strategii prowadzenia procesu diagnostycznego.

Należy zwrócić uwagę na fakt, że założony sposób modelowania metawiedzy systemu pozwala także na wybiórcze definiowanie kosztów, poprzez przypisywanie wybranym atrybutom A_{ji} wartości 0. Cechą pożądaną systemu jest możliwość predefiniowania w systemie wielu funkcji celów i umożliwienie użytkownikom wyboru jednej z nich w momencie inicjalizacji procesu diagnostycznego systemu, w zależności od uwarunkowań sytuacyjnych.

3. Realizacja systemu

3.1. Realizacja systemu dla testowania przyjętych rozwiązań

W celu przetestowania proponowanych rozwiązań i przekonania się na ile nowa wersja bazy wiedzy i związana z metawiedzą nowa funkcjonalność systemu potrafią dopasować działania systemu do działań rzeczywistych ekspertów, konieczne było przeprowadzenie testów na zbudowanej dla tych celów testowej bazie wiedzy dla wybranej dziedziny jej zastosowania.

Analizując możliwości techniczne rozszerzenia systemu BayEx o wnioskowane funkcjonalności oraz biorąc pod uwagę małe możliwości uzyskania produktu spełniającego obecne wymagania, zdecydowano o budowie nowego systemu, który będzie wykorzystywał podstawowe złożenia swego poprzednika. Do założeń dla nowego systemu dołączony został wymóg rozszerzenia bazy wiedzy systemu o metawiedzę oraz rozszerzenie funkcjonalności modułu wnioskowania o jej wykorzystywanie. Podstawowe założenia techniczne dla nowej aplikacji to: nowoczesne narzędzia realizacji, zapewniające w pełni przenośny kod, gwarantujący nie tylko taki sam mechanizm działania, ale i wygląd aplikacji na różnych platformach operacyjnych, modułarna budowa, umożliwiająca przyszłe aktualizacje i rozbudowę, uporządkowany sposób przechowywania danych zarówno wiedzy, jak i metawiedzy systemu.

Zrealizowany system JBEEx [6] w pełni odpowiada założeniom. Realizacja systemu opierającego się na języku Java pozwoliła, wykorzystując środowisko netBeans, zbudować wielowarstwową aplikację spełniającą pożądaną paradygmat MVC. Logiczną i fizyczną zwartość bazy wiedzy, łącznie z jej wysoką dostępnością, uzyskano poprzez wykorzystanie wbudowanej relacyjnej bazy danych HSQLDB. Ewentualną wymagalność czytelności i przenośności samej bazy wiedzy uzyskano poprzez umożliwienie importu i eksportu źródłowych baz wiedzy do plików XML.

3.2. Testowa baza wiedzy – nadciśnienie tętnicze

Aby ocenić rolę metawiedzy dziedzinowej w sterowaniu procesem diagnostycznym, skonstruowana została testowa baza wiedzy, dotycząca diagnostyki różnych postaci nadciśnienia tętniczego. Z powodu dużego rozpowszechnienia w cywilizowanych, uprzemysłowionych populacjach osób dorosłych, w tym także w Polsce, nadciśnienie tętnicze to jeden z podstawowych problemów, z którymi w codziennej praktyce stykają się lekarze różnych specjalności. Stanowi ono jeden z najważniejszych czynników ryzyka miażdżycy i związanych z nią chorób sercowo-naczyniowych [4]. Przy wyborze dziedziny zastosowania systemu nie bez znaczenia był fakt udziału w badaniach jednego ze współautorów artykułu, mającego oprócz doświadczenia informatycznego odpowiednie przygotowanie teoretyczne i praktyczne w tej dziedzinie (specjalizacja w zakresie chorób wewnętrznych i kardiologii).

Zbudowany system jest przeznaczony zarówno dla pacjentów, jak i lekarzy. Pacjentom może być pomocy we wstępnym samorozpoznaniu nadciśnienia tętniczego. Lekarzom natomiast może służyć do wspomagania diagnostyki różnicowej różnych postaci nadciśnienia tętniczego. Jednak z uwagi na specjalistyczną wiedzę zawartą w systemie oraz specjalistyczne słownictwo, mimo jego testowego charakteru, system jest skierowany głównie dla lekarzy.

Testowa baza wiedzy [6], widziana przez pryzmat rozpatrywanego problemu, zawiera definicje podstawowych typów nadciśnienia (nadciśnienie pierwotne i 16 pozostałych to różne postaci nadciśnienia wtórnego), zbiór symptomów (87 elementów), odpowiadających najbardziej istotnym objawom i wynikom badań wykonywanych i zleczanych przez lekarzy ekspertów w procesie diagnozy rozpoznawania nadciśnienia tętniczego [4, 5 i 8]. Relacje pomiędzy hipotezami i symptomami (w liczbie 267), z zachowaniem formalnych wymogów, określono na podstawie dostępnej literatury medycznej. Podobnie ustalając stopień powiązań pomiędzy hipotezami i wybranymi symptomami (prawdopodobieństwa a posteriori) oraz prawdopodobieństwa a priori hipotez oparto się na literaturze fachowej [4, 5 i 8].

W metawiedzy systemu zawarte zostały ważne (z punktu widzenia lekarza praktyka) uwarunkowania, uwzględniające: koszt uzyskania informacji o każdym z symptomów, wyrażony kwotowo oraz czas potrzebny na uzyskanie tej informacji, wyrażony w dniach. Uznano, że te dwa uwarunkowania są z jednej strony istotne dla procesu diagnostycznego, a z drugiej łatwe do wartościowania w procesie akwizycji wiedzy oraz intuicyjnie zrozumiałe, co powinno pomóc w procesie badań zachowań testowej bazy wiedzy.

Celem oceny roli jaką może odegrać metawiedza w poprawnym przeprowadzeniu procesu diagnostycznego predefiniowano trzy funkcje celu, ustalające różne strategie wyznaczania statycznego kosztu przypisywanego każdemu z symptomów. Pierwsza funkcja celu to Funkcja_czas biorąca pod uwagę uwarunkowania związane tylko z czasem potrzebnym na uzyskanie informacji. Kolejna, Funkcja_koszt uwzględnia uwarunkowania związane z kosz-

tem finansowym uzyskania informacji, a ostatnia Funkcja_czas_koszt, uwzględnia oba powyższe uwarunkowania. Wszystkie funkcje celu zostały określone z różnymi wagami odpowiednio preferującymi czynniki czasu i kosztu, ustalając różne strategie realizacji procesu diagnostycznego [6].

3.3. Testy porównawcze i wyniki

Tabela 1

Przykłady wpływu użycia funkcji celu na kolejność pozyskiwania informacji o symptomach oraz obserwowane podczas ekspertyz wartości diagnostyczne symptomów

Kol.	Brak funkcji celu		Funkcja_KOSZT ¹		Funkcja_CZAS_KOSZT ²	
	Nazwa symptomu	Wartość diagnostyczna	Nazwa symptomu	Wartość diagnostyczna	Nazwa symptomu	Wartość diagnostyczna
1.	Wysokie ciśnienie przy pomiarze	1,813682	Wysokie ciśnienie przy pomiarze	1,80679	Wysokie ciśnienie przy pomiarze	1,811271
2.	Wysoki poziom PTH	0,999981	Różnica ciśnień na kończynach	0,996171	Różnica ciśnień na kończynach	0,998673
3.	Zwężenie aorty w aortografii	0,999971	Powiększenie dłoni lub stóp	0,995598	Powiększenie dłoni lub stóp	0,998097
4.	Uzury w RTG klatki piersiowej	0,999971	Napadowy charakter	0,995526	Napadowy charakter	0,998026
5.	Różnica ciśnień na kończynach	0,999971	Pogorszenie wzroku (ograniczenie pola widzenia)	0,995395	Pogorszenie wzroku (ograniczenie pola widzenia)	0,997895
6.	Wzrost wydalania z moczem 17-hydroksyketosteroidów	0,999711	Duża amplituda tętna	0,993273	Duża amplituda tętna	0,995768
7.	Test hamowania GH glukozą	0,999697	Nadużywania leków przeciwbólowych	0,989388	Nadużywania leków przeciwbólowych	0,991873
8.	Mała aktywność reninowa osocza	0,999567	Szybka progresja nadciśnienia	0,989195	Szybka progresja nadciśnienia	0,991679
9.	Zmiany w RTG czaszki	0,999394	Słaba reakcja na leczenie	0,979456	Uzury w RTG klatki piersiowej	0,986122
10.	Powiększenie dłoni lub stóp	0,999393	Uzury w RTG klatki piersiowej	0,977172	Mała aktywność reninowa osocza	0,983823
¹ – Kolejność wyboru symptomów dla funkcji celu: Funkcja_KOSZT z parametrem n=0,95						
² – Kolejność wyboru symptomów dla funkcji celu: Funkcja_CZAS_KOSZT z parametrami m=0,5 i n=0,95						

Testy pozwoliły stwierdzić, że wprowadzane koncepcje modelu metawiedzy (uwarunkowań i funkcji celu wg wzoru 4) pozwalają w zadawalającym stopniu wpływać na wybór kolejności pozyskiwanych przez system informacji. Za pomocą wartości przypisywanym uwarunkowaniom i wagom, uzyskuje się akceptowalną czułość systemu na realizację założonych strategii. Oceny przeprowadzonych testów, podobnie jak wnioski, oparte zostały na subiektywnej ocenie osób testujących system, bez poddania ich bardziej obiektywnej ocenie, wymagającej kolejnych badań, działań i kosztów.

Ze względu na niełatwy proces definiowania metawiedzy systemu, na bazie doświadczeń związanych z testowaniem proponowanych rozwiązań przygotowano zostały wskazówki metodycznego postępowania eksperta na etapie: akwizycji, walidacji i testowania bazy wiedzy, ze szczególnym uwzględnieniem jej metawiedzy [6].

Podstawowe testy [6] dotyczyły badania możliwości rzeczywistego wpływu poprzez wartości metawiedzy na przebieg procesu wnioskowania systemu, z wykorzystaniem predefiniowanych w systemie testowym trzech przykładowych funkcji celu (Funkcja_czas, Funkcja_koszt, Funkcja_czas_koszt), dodatkowo „manipulując” wagami przypisywanymi poszczególnym uwarunkowaniom.

Przykład wpływu różnych postaci funkcji celu na przebieg fragmentu procesu ekspertyzy został przedstawiony w tabeli 1.

Na testowej bazie wiedzy wykonano liczne testy, początkowo przez autorów, a później przez innych specjalistów z dziedziny medycyny. Kolejno, testowano i walidowano podstawową bazę wiedzy (warunek $C=0$), a następnie najbardziej interesujący – z punktu widzenia badań – aspekt roli, jaką odgrywa metawiedza systemu w realizacji dopasowania procesu ekspertyzy systemu do toku rozumowania eksperta.

4. Podsumowanie

Podstawowym celem prezentowanych badań było zidentyfikowanie realnych potrzeb i ustalenie możliwości dopasowania toku rozumowania systemu ekspertowego do procedury diagnostycznej eksperta w założonym środowisku systemu ekspertowego. Wybór systemu BayEx nie był przypadkowy. Postać probabilistycznej wiedzy tego systemu ma wiele zalet, a autorzy mieli do dyspozycji pełne wersje tego systemu, teoretycznie ułatwiające zadanie tworzenia rozszerzeń, realizujących przedmiot badań. Technologia wykonania systemu i liczba wprowadzanych do systemu zmian skłoniły autorów do stworzenia całkiem nowej wersji systemu (JBEx). Korzystając z tej możliwości, oprócz zmian dotyczących technicznej realizacji oprogramowania do systemu, wprowadzono wiele funkcjonalności, wynikających z dopasowania charakteru zadań realizowanych przez system do rzeczywistych oczekiwań użytkowników w środowisku medycznym. Podstawowym rozszerzeniem było wprowadzenie, obok opisywanego już trybu diagnostycznego, realizacji ekspertyzy, także trybu weryfikowania dowolnego podzbioru hipotez. Pozwala on na „szybki” proces wnioskowania, oszczędny w ilości koniecznych do przekazania systemowi informacji o symptomach. Podobnym w swym charakterze rozszerzeniem funkcjonalności systemu jest wprowadzenie dodatkowego trybu wprowadzania informacji o symptomach, uwzględniającego możliwość wstępnego

podania przez użytkownika zbiorczej informacji o wybranych przez niego symptomach, już na etapie inicjalizacji pracy systemu.

Konieczność weryfikacji przyjętych rozwiązań w zakresie metawiedzy i jej wykorzystywania przez procedury motoru wnioskowania rozszerzyła zakres prac na cały proces tworzenia dziedzinowej bazy danych, z pełnym uwzględnieniem proponowanych w niej rozszerzeń. Stworzona baza wiedzy umożliwiająca rozpoznawanie typów nadciśnienia tętniczego stała się nie tylko bazą testową, ale przedstawia znaczną wartość użytkową. System wraz z bazą wiedzy poddawany jest obecnie testom akceptacyjnym, wykonywanym w środowisku lekarskim. Wstępne opinie z jednej strony wskazują na pozytywny odbiór zastosowanych rozwiązań w zakresie metawiedzy systemu, z drugiej koncentrują się na uwagach odnośnie wiedzy dziedzinowej testowej bazy wiedzy. Jest to zrozumiałe ze względu na stosunkowo trudny i mało jeszcze sformalizowany sposób akwizycji i walidacji wiedzy dla metawiedzy systemu – wyboru uwarunkowań i ich wartościowania, a także identyfikacji i konstrukcji funkcji celów.

BIBLIOGRAFIA

1. Cichosz T.: Systemy uczące się. WNT, Warszawa 2000.
2. Gelman A., Carin J. B., Stern H. S., Rubin D. B.: Bayesian Data Analysis. Chapman & HALL/CRC, 2004.
3. GeNIe: http://genie.sis.pitt.edu/wiki/Support_for_Diagnosis:_Cost_of_Observation .
4. Januszewicz A., Januszewicz W., Szczepańska-Sadowska E., Sznajderman M. (red.): Nadciśnienie tętnicze. Medycyna Praktyczna, Kraków 2007.
5. Kokot F. (red.): Diagnostyka różnicowa objawów chorobowych. PZWL, Warszawa 2007.
6. Mazgaj A., Ząbek A.: Realizacja systemów ekspertowych z probabilistycznymi bazami wiedzy – analiza porównawcza wybranych własności. Praca dyplomowa, Katedra Informatyki AGH w Krakowie, promotor Valenta M., Kraków 2010.
7. Michalski R. S., Kaufman K. A., Pietrzykowski J., Śnieżyński B., Wojtusiak J.: Learning Symbolic User Models for Intrusion Detection: A Method and Initial Results. [in:] Kłopotek M.A. et al. (eds.): Intelligent Information Processing and Web Mining, Proceedings, Advances in Soft Computing. Springer, 2006.
8. Szczeklik A. (red.): Choroby wewnętrzne. Stan wiedzy na rok 2010, Wydawnictwo Medycyna Praktyczna, Kraków 2010.
9. Tadeusiewicz R., Wajs W. (red.): Informatyka Medyczna. Wydawnictwo AGH, Kraków 1999.

10. Valenta M., Zygmunt A.: Probabilistyczna wiedza medyczna i jej wykorzystanie w systemach ekspertowych, [w:] Bubnicki Z., Grzech A. (red.): Inżynieria wiedzy i systemy ekspertowe, V Krajowa Konferencja Naukowa, Wrocław 2003.
11. Valenta M., Zygmunt A.: Process of building the probabilistic knowledge model, (in:) Grabara J. K. (ed.): Selected problems of IT application. WNT, Warszawa 2004.

Recenzenci: Dr inż. Alina Momot
Prof. dr hab. inż. Tadeusz Wiczorek

Wpłynęło do Redakcji 31 stycznia 2011 r.

Abstract

The inference processes based on probabilistic knowledge bases have many recognized advantages, but also many features, which leave them a lot to be desired from the user's point of view. The article on an example of a diagnostic system based on a probabilistic knowledge base and Naive Bayesian Inference, analyzing mismatch characteristic of the system's reasoning and an expert's reasoning, shows the solution of extending a basic knowledge base with specialized, domain-dependant meta-knowledge. The authors show many aspects of the system's inference adaptation to requirements of the real-life diagnostic process which has significant impact on substantial scope and the character of a representation of a meta-knowledge. The problem analysis in medical diagnostic systems shows the possibility of taking into consideration many different types of conditionings assigned to symptoms, which might be mapped to a cost function of the information acquisition about symptoms. This might be for instance "a cost" related to the invasiveness of an examination, which results in the information about a symptom, "a cost" related to the time of obtaining an information or even the real financial cost of an examination. The proposed method allows to create any target functions which take into consideration an influence of the conditionings defined in the knowledge-base on the final cost of a symptom information acquisition. This cost jointly with the traditionally calculated dynamic diagnostic value measurement of a symptom (formula 1), determines the final sequence of symptom information acquisition by the system (formula 4). This makes the whole process similar to the real procedure executed by experts. In support of thesis, the authors present information about constructing the expert system which implements above assumptions. For real-life testing of the role of proposed system's meta-knowledge, the domain knowledge base has been created which is designed to diagnosis

different types of hypertension. The knowledge base takes into consideration above mentioned conditionings: the invasiveness of examinations, the time of obtaining an information about a symptom and the financial cost. The subjective evaluation of the tests results executed for a couple of differently defined target functions shows large usability of the proposed solutions.

Adresy

Marek VALENTA: Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Informatyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska, valenta@agh.edu.pl.

Andrzej ZĄBEK: Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Informatyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska;

Krakowski Szpital Specjalistyczny im. Jana Pawła II, Oddział Kliniczny Elektrokardiologii, ul. Prądnicka 80, 31-202 Kraków, Polska, andrzej_j_z@poczta.onet.pl.

Aleksander MAZGAJ: Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Informatyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska, aleks@datadiscovery.pl.