



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

TVORBA BÁZE ZNALOSTÍ

CREATION OF KNOWLEDGE BASE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jiří Šiška

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.

BRNO 2023

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Jiří Šiška

ID: 230188

Ročník: 3

Akademický rok: 2022/23

NÁZEV TÉMATU:

Tvorba báze znalostí

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Proveďte rešerši na téma umělá inteligence a expertní systémy.
2. Seznamte se s expertním systémem NPS a se syntaxí jeho báze znalostí.
3. Vyberte si oblast, na kterou bude báze znalostí expertního systému zaměřena.
4. Zaměřte se na znalostní inženýrství a pro vybranou oblast ve spolupráci s expertem navrhnete a odladíte bázi znalostí.
5. Dosažené výsledky otestujte a zhodnoťte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

KOŘÍNEK L.: Uživatelské rozhraní pro expertní systém. Brno, 2019, 82 s. Bakalářská práce. VUT v Brně, FEKT, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce: doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.

KRECHLER M.: Diagnostický expertní systém. Brno, 2017, 73 s. Diplomová práce. VUT v Brně, FEKT, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce: doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.

MAŘÍK V., ŠTĚPÁNKOVÁ O., LAŽANSKÝ J. a kolektiv: Umělá inteligence (2). Academia, Praha 1997.

Termín zadání: 6.2.2023

Termín odevzdání: 22.5.2023

Vedoucí práce: doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a tvorbou báze znalostí pro diagnostický expertní systém NPS se zaměřením na diagnostiku ektatických onemocnění rohovky. Součástí práce je i seznámení čtenáře se znalostním inženýrstvím a s vlastnostmi expertních systémů, jejich charakteristickými rysy a jejich aplikací.

KLÍČOVÁ SLOVA

Báze znalostí, expertní systém, umělá inteligence, znalostní inženýrství, oftalmologie, ektatická onemocnění rohovky, keratokonus, keratoglobus, pelucidní marginální degenerace

ABSTRACT

This bachelor's thesis is focused on design and creation of a knowledge base for the NPS diagnostic expert system with a focus on the diagnosis of ectatic corneal diseases. Part of the work is also to introduce the reader to knowledge engineering and the properties of expert systems, their characteristic features and their applications.

KEYWORDS

Knowledge base, expert system, artificial intelligence, knowledge engineering, ophthalmology, ectatic corneal diseases, keratoconus, keratoglobus, pellucid marginal degeneration

ŠIŠKA, Jiří. *Tvorba báze znalostí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2023, 47 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Jiří Šiška
VUT ID autora: 230188
Typ práce: Bakalářská práce
Akademický rok: 2022/23
Téma závěrečné práce: Tvorba báze znalostí

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Václavu Jirsíkovi, CSc. za odborné vedení, přínosné konzultace a podnětné návrhy k práci. Dále bych velice rád poděkoval paní Mgr. Haně Řehákové za její ochotu, čas, trpělivost a odborné znalosti při spolupráci na tvorbě, ladění a testování báze znalostí. Panu doc. RNDr. Františkovi Pluháčkovi, Ph.D. za jeho čas a ochotu poskytnout zpětnou vazbu a panu Ing. Lukášovi Kořínkovi za zprovoznění domény, na kterou jsem mohl svou bázi znalostí nahrát a zpřístupnit ji tak odborníkům.

Obsah

Úvod	11
1 Expertní systémy	12
1.1 Umělá inteligence	12
1.2 Vlastnosti expertních systémů	13
1.3 Filozofie expertních systémů	14
1.4 Rozdělení expertních systémů	15
1.5 Diagnostické expertní systémy	15
1.5.1 Vnitřní struktura	15
1.5.2 Princip	16
1.6 Aplikace expertních systémů	19
1.6.1 Expertní systém NPS	21
2 Báze znalostí	22
2.1 Znalostní inženýrství	22
2.1.1 Znalostní inženýrství v praxi	24
2.2 Syntaxe báze znalostí	25
3 Oftalmologie	29
3.1 Rohovka	29
3.2 Vyšetření rohovky	29
3.2.1 Keratometr	30
3.2.2 Topografie rohovky	30
3.2.3 Pachymetrie	31
3.2.4 Bezkontaktní tonometr	31
3.2.5 Štěrbínová lampa	31
3.3 Ektázie rohovky	31
3.3.1 Keratokonus	32
3.3.2 Keratoglobus	34
3.3.3 Pelucidní marginální degenerace	35
4 Návrh a ladění báze znalostí	36
4.1 Hypotézy	36
4.2 Pokládané otázky a možné odpovědi	36
4.3 Výsledná báze znalostí	39
4.4 Zhodnocení dosažených výsledků	41
4.4.1 Testování	41
4.4.2 Využití	41

4.4.3 Porovnání s konkurencí	42
Závěr	44
Literatura	45
A Příloha - Báze znalostí	47

Seznam obrázků

1.1	Blokové schéma diagnostického expertního systému	16
1.2	Grafická reprezentace pravidla diagnostického expertního systému . .	17
1.3	Grafické znázornění přepočtu pravděpodobnosti uzlu	18
1.4	Grafické znázornění přepočtu pravděpodobnosti hrany	19
1.5	Přechod z NPS32 na webové rozhraní NPS	21
2.1	Hierarchie znalostí	22
2.2	Fáze činnosti znalostního inženýra	23
3.1	Ukázka topografické mapy z přístroje PENTACAM	30
3.2	Keratokonus	32
3.3	Keratoglobus	34

Seznam tabulek

2.1	Výchozí odpovědi expertního systému NPS	27
4.1	Tabulka navržené báze znalostí včetně vah vazeb	40
4.2	Výsledky ověření funkčnosti báze znalostí	41

Úvod

Expertní systémy spadají do oblasti úzké umělé inteligence. Správným zakódováním znalostí a zkušeností experta nebo expertů do báze znalostí je expertní systém schopen provádět rozhodnutí v určitém odvětví na vysoce odborné úrovni. Tyto systémy se uplatňují mimo jiné zejména v lékařství, zemědělství, obchodu, při diagnostice poruch zařízení nebo v oboru psychologie. Mohou být nápomocné při vzdělávání studentů nebo také v praxi - v tomto případě např. oftalmologům nebo na pobočkách očních optik.

První kapitola se věnuje teorii expertních systémů, jejich umístěním v oblasti umělé inteligence, jejich dělením, vnitřní struktuře, vlastnostem a aplikacím.

Druhá kapitola rozebírá bázi znalostí pro expertní systém NPS, popisuje její syntaxi a blíže se zaměřuje na znalostní inženýrství.

Ve třetí kapitole jsou probírána ektatická onemocnění rohovky, jejich typy a projevy. Také jsou zde uvedeny oftalmologické přístroje a metody sloužící k vyšetření rohovky.

Čtvrtá kapitola se zabývá návrhem a laděním výsledné báze znalostí, což zahrnuje hypotézy, otázky, odpovědi a vazby mezi nimi. V této kapitole je také zhodnocena funkčnost expertního systému s implementovanou bází znalostí.

1 Expertní systémy

Expertní systémy jsou počítačové programy, simulující rozhodovací činnost experta při řešení složitých úloh a využívající vhodně zakódovaných, explicitně vyjádřených speciálních znalostí, převzatých od experta, s cílem dosáhnout ve zvolené problémové oblasti kvality rozhodování na úrovni experta. - E. A. Feigenbaum a kol., 1988. [3]

Pojmem expertní (nebo také znalostní) systém označujeme program, který dokáže provádět rozhodnutí na úrovni experta. To dokáže na základě odpovědí uživatele na pokládané otázky, které se týkají určité problematiky, pro kterou má daný expertní systém odladěnou tzv. bázi znalostí. Tento rozhodovací proces tedy probíhá formou dialogu expertního systému s uživatelem.

1.1 Umělá inteligence

Expertní systémy spadají do obecného a velice širokého zastřešujícího termínu „umělá inteligence“. Inteligenci jako takovou lze obecně definovat jako schopnost - tedy např. schopnost učit se, schopnost řešit problémy, dovednost myslet, abstraktně přemýšlet, plánovat či učit se ze zkušeností. Chceme-li nyní nějakým způsobem definovat pojem umělá inteligence, můžeme konstatovat, že jde o jakýkoliv výpočetní systém vykonávající činnost, kterou si spojujeme s lidskou inteligencí. [1]

Umělou inteligenci dělíme do tří úrovní:

- úzká umělá inteligence,
- obecná umělá inteligence,
- super umělá inteligence.

Úzká umělá inteligence je jediná forma umělé inteligence, které lidstvo zatím dosáhlo. Jedná se totiž o vznešený název softwarového řešení, které nejprve musel vymyslet a vyvinout nějaký člověk. Do této úrovně spadá např. strojové učení, robotika, strojové vidění a expertní systémy. [1]

Obecná umělá inteligence, též někdy označována jako umělá inteligence na úrovni člověka, jsou systémy schopné samostatného rozhodování a myšlení. [1]

Poslední úrovní umělé inteligence je super umělá inteligence, která se vyznačuje inteligencí mnohem vyšší než mají lidé a schopností předčít lidstvo v prakticky každé oblasti, ve které vyniká. [1]

Umělá inteligence dokáže samozřejmě již dnes porazit člověka v některých (převážně matematických) disciplínách, ovšem prozatím se pohybujeme pouze na úrovni úzké umělé inteligence, na které dle mého názoru ještě určitou dobu zůstaneme.

1.2 Vlastnosti expertních systémů

Expertní systémy se od ostatních odvětví umělé inteligence liší převážně kladením většího důrazu na kvalitu znalostí než na algoritmy. Výhodou expertních systémů je transparentnost v rozhodování. Oproti umělým neuronovým sítím, kde nevíme, na základě jakých parametrů se vyhodnotil výsledek, můžeme u expertních systémů přesně určit, jak dané odpovědi ovlivňují výsledek konzultace. [3]

Mezi charakteristické vlastnosti expertních systémů patří [3]:

1. **Znalosti experta jsou vyjádřeny naprosto explicitně**, v podobě tzv. báze znalostí, která by měla být navržena tak, aby se v ní vyznal i samotný expert a byl ji schopen sám modulovat. Báze znalostí musí mít tedy možnost velkého stupně modularity.
2. **Dialogový režim získávání dat od uživatele**. Expertní systém aplikuje své znalosti na určitý případ či problém poskytnutý odpověďmi uživatele.
3. **Schopnost pracovat s určitou mírou neurčitosti**. Podobně jako experti, musí být expertní systém schopen pracovat s nejistými odpověďmi (např. popis subjektivních potíží pacienta) a s nejistými znalostmi.
4. **Vyvozený závěr expertního systému není závislý na jediném parametru**. Systém musí být schopen poskytnout radu i při neúplnosti vstupních dat. Musí tedy existovat více alternativních cest k vyhodnocení hypotézy.
5. **Expertní systém je schopen poskytnout zdůvodnění a vysvětlení dosažených závěrů**. Chceme-li nahradit experta expertním systémem, je nutné, aby takový systém uměl podobně jako expert vysvětlit odvozovací proces uživateli.

Výčet těchto vlastností slouží pouze pro objasnění klíčových myšlenek expertních systémů a nelze je považovat za definiční. Konkrétní systém nemusí splňovat všechny výše uvedené body, aby se mohl řadit do kategorie expertních systémů. Existuje například řada úspěšných expertních systémů nepracujících s neurčitostí. [3]

1.3 Filozofie expertních systémů

Na expertní systémy lze pohlížet jako na nástroj, díky kterému můžeme předat znalosti a letité zkušenosti špičkových expertů do rukou široké veřejnosti. Ke znalostem experta může mít tím pádem přístup mnohem větší počet lidí, a to ve stejný časový okamžik. Tím dochází ke zvětšení dosahu expertova působení bez jeho časového vytížení.

Expertní systém může být pouze tak kvalitní, jak jsou kvalitní znalosti, ze kterých systém čerpá. Tyto znalosti musí být samozřejmě i vhodně zakódovány. To znamená, že za kvalitu a funkčnost těchto systémů jsou ve většině případů zodpovědní minimálně dva lidé - expert a znalostní inženýr. Skutečnost, že je zapotřebí experta s hlubokým porozuměním dané problematiky, který je ochoten spolupracovat na tvorbě báze znalostí pro expertní systém, je jedním z možných důvodů, proč nejsou expertní systémy používány i tam, kde by bylo jejich použití vhodné.

S příchodem nových relevantních informací je zapotřebí aktualizovat bázi znalostí expertního systému. Máme-li již funkční a odladěnou bázi znalostí pro určitou problematiku, moc často se nestává, aby se musela z tohoto důvodu aktualizovat. Správně navržené expertní systémy jsou totiž již z principu velmi robustní, jelikož jsou založeny na zkušenostmi potvrzených znalostech, které se jen zřídka s postupem času mění.

S pokrokem v oblasti umělé inteligence se ve větší míře prosazují jiné přístupy (např. strojové učení). To je dle mého názoru částečně zapříčiněno charakterem problémů, které expertní systémy řeší a také částečně tím, že expertní systémy jsou již „vyřešenou oblastí“ s osvědčenými postupy. Může se zdát, že už tedy není co nového objevovat a neexistuje moc prostoru ke zlepšení. I přesto se expertní systémy hojně používají v nejrůznějších aplikacích a jsou často součástí větších systémových celků. Firmám mohou poskytnout kompetitivní výhodu nad konkurencí.

Obzvláště v dnešní době by měl být kladen větší důraz na tvorbu expertních systémů, jelikož skutečných expertů ve světě ubývá. Zejména v odvětvích, kterým dnešní mladší generace nevěnuje. Zakódováním „know-how“ těchto expertů do báze znalostí, je možné docílit „zvěčnění“ jejich znalostí a rozhodovacích schopností, díky čemuž by z nich bylo možné čerpat i po jejich smrti v budoucnu, bude-li potřeba.

1.4 Rozdělení expertních systémů

Existující expertní systémy lze rozdělit do tří skupin, a to na systémy diagnostické, plánovací a hybridní. [3]

- **Diagnostické expertní systémy** mají za úkol v průběhu konzultace vyhodnocovat, o které z předem daných hypotéz se jedná, na základě vstupních dat.
- **Plánovací expertní systémy** řeší takové úlohy, ve kterých je znám počáteční stav a cíl řešení. Úkolem systému je nalézt, pokud možno, optimální posloupnost kroků, kterými lze, na základě dostupných vstupních dat o konkrétním případě, daného cíle dosáhnout. Výsledkem je dynamický seznam navržených řešení, které bývají ohodnoceny jistou mírou optimality.
- **Hybridní (dedikované) systémy** částečně využívají principů diagnostických expertních systémů a částečně plánovacích expertních systémů. Vyznačují se kombinovanou architekturou a řadíme k nim např. monitorovací nebo inteligentní výukové systémy.

1.5 Diagnostické expertní systémy

Báze znalostí v této práci je vytvářena pro diagnostický expertní systém NPS. Proto je zde tento typ expertních systémů rozebírán více do detailu.

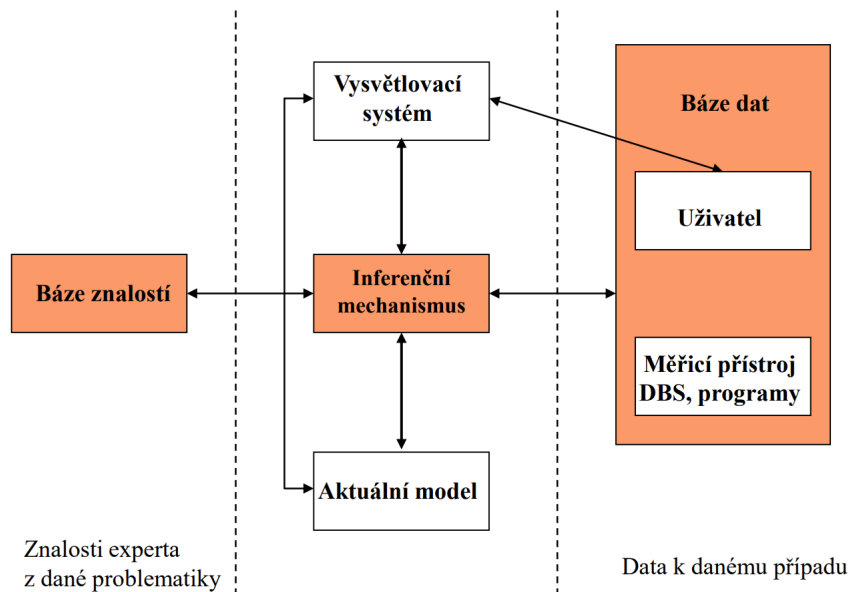
Jedná se o nejrozšířenější třídu expertních systémů. Určují, která hypotéza z předem definovaného počtu cílových hypotéz nejlépe koresponduje s daty souvisejícími s konkrétním případem. Diagnostické expertní systémy tedy pracují s konečným počtem cílů (hypotéz, diagnóz), ze kterých vybírají ty nejvhodnější. [1]

1.5.1 Vnitřní struktura

Na obrázku 1.5 je vyobrazeno blokové schéma diagnostického expertního systému. Vidíme, že se systém skládá ze tří hlavních částí oddělených čárkovanými čarami, přičemž inferenční mechanismus je dodatečně napojen ještě na vysvětlovací systém a aktuální model, se kterými interaguje. [2], [3], [4]

- **Báze znalostí** obsahuje explicitní, vhodně zakódované znalosti experta z dané problematiky, které jsou nutné ke správné funkci expertního systému.
- **Báze dat** představuje data získaná buďto prostřednictvím uživatele formou odpovědí na položené otázky nebo data odečtená přímo z měřicích přístrojů, programů nebo databází. Báze dat ovlivňuje aktuální model diagnózy.

- **Inferenční mechanismus** je jádrem expertního systému. Na základě jednotlivých přijatých odpovědí upřesňuje pomocí báze dat aktuální model.
- **Aktuální model** je právě probíhající konzultace. Je to tedy množina aktuálních poznatků a faktů o současném stavu řešeného problému. Je dynamicky upravován inferenčním mechanismem na základě odpovědí uživatele a zakódovaných pravidel a znalostí v bázi znalostí.
- **Vysvětlovací systém** má za úkol objasnit uživateli důvody svého rozhodování. Tedy např. proč se expertní systém rozhodl pro dané hypotézy nebo z jakého důvodu byly položeny určité otázky.



Obr. 1.1: Blokové schéma diagnostického expertního systému. [3]

Při tvorbě expertních systémů bývá kladena snaha na to, aby byl program realizován co nejvíce modulárně pro případná rozšiřování a úpravy v budoucnu. [2]

1.5.2 Princip

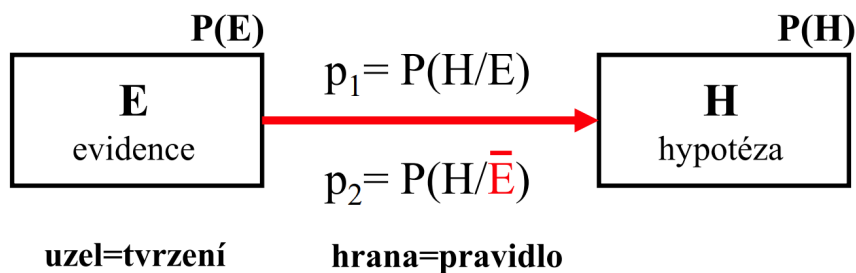
Nutno prvně podotknout, že následující principy se uplatňují v expertním systému NPS, nejedná se tedy o univerzální principy platné pro všechny expertní systémy.

Znalosti jsou reprezentovány pomocí pravidel. [1]

IF < předpoklad E > THEN < závěr H > WITH < váha p_1 >

Kde E (evidence) a H (hypothesis) jsou elementární tvrzení a p_1 je subjektivní míra důvěry experta v platnost daného pravidla. Je-li tedy splněn předpoklad E , expertní systém uzná hypotézu (závěr) H s vahou p_1 . [1]

Můžeme tedy konstatovat, že diagnostický expertní systém je založen na pravidle $E \rightarrow H$ s vahou p_1 , což lze následovně graficky znázornit.



Obr. 1.2: Grafická reprezentace pravidla diagnostického expertního systému. [1]

Kde $P(E)$ a $P(H)$ jsou výchozí pravděpodobnosti předpokladu E a hypotézy H . Označení p_1 a p_2 je subjektivní míra důvěry experta v dané pravidlo a $P(H/E)$, $P(H/\bar{E})$ vyjadřuje pravděpodobnost hypotézy H , pokud víme, že platí (nebo neplatí) předpoklad E . [1]

Inferenční mechanismus expertních systémů využívá základních logických odvozacích pravidel **modus ponens** a **modus tollens**. [1]

- **Modus ponens** je pravidlo přímého usuzování. Tedy jestliže platí předpoklad E a pravidlo $E \rightarrow H$, pak platí závěr H .

$$\frac{E, E \rightarrow H}{H}$$

Jestliže je noc, je tma. Je noc. Je tedy tma.

- **Modus tollens** je pravidlo nepřímého usuzování. Tedy jestliže platí pravidlo $E \rightarrow H$ a závěr je \bar{H} , pak platí předpoklad \bar{E} .

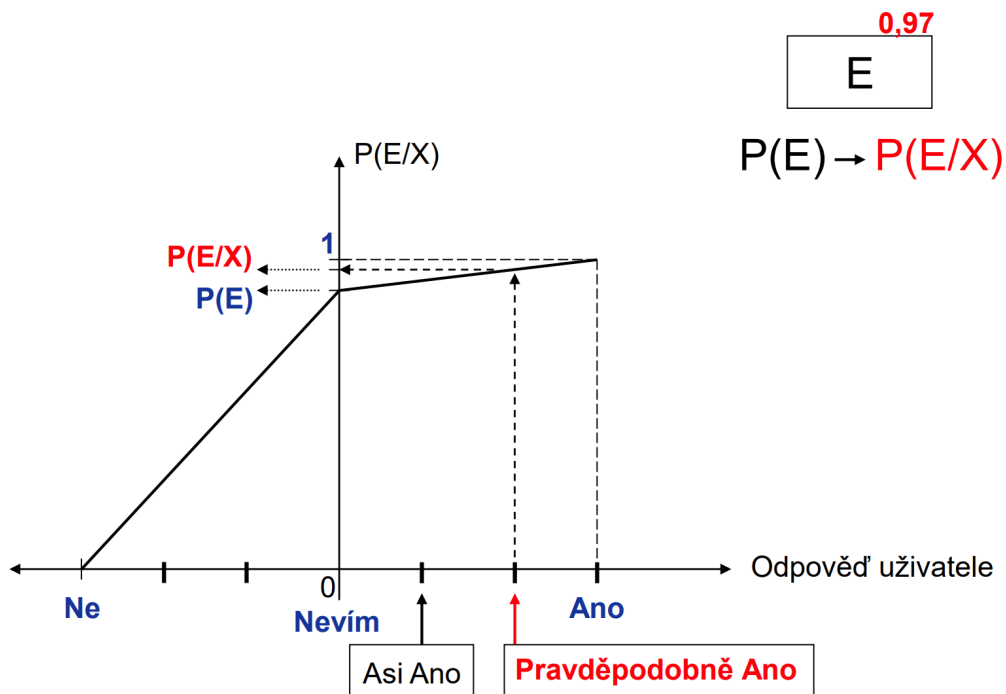
$$\frac{\bar{H}, E \rightarrow H}{\bar{E}}$$

Jestliže je noc, je tma. Není tma, není tedy noc.

Výběr položeného dotazu expertní systém provádí na základě velikostí hodnot pravděpodobností uzlů. Systém tedy vybere otázku s největší hodnotou pravděpodobnosti, která ještě dosud nebyla položena. Po přijetí odpovědi uživatele dochází k přepočtu jednotlivých pravděpodobností v bázi znalostí a následně se pokládá další dosud nepoložený dotaz s největší hodnotou pravděpodobnosti, pokud ještě nějaký zůstává. Mají-li všechny otázky stejnou hodnotu pravděpodobnosti, pokládají se postupně tak, jak jsou v bázi znalostí uvedeny.

Přepočet pravděpodobností uzlů (tvrzení) a hran (pravidel) lze nejlépe vysvětlit na následujícím příkladu.

- Přepočet pravděpodobnosti uzlu (tvrzení)

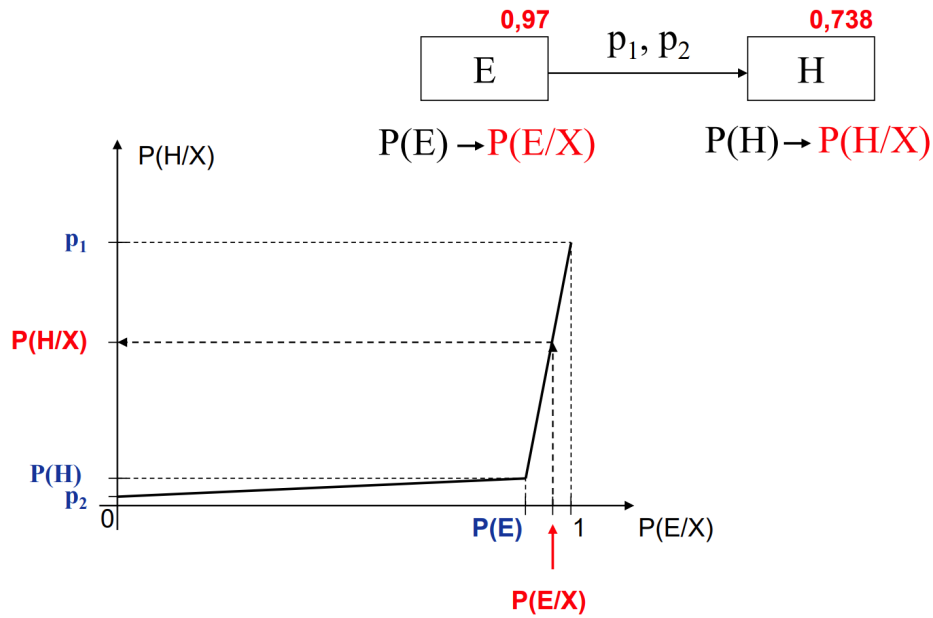


Obr. 1.3: Grafické znázornění přepočtu pravděpodobnosti uzlu. [1]

Na obrázku 1.3 můžeme vidět situaci, kdy uživatel odpoví na položený dotaz "Pravděpodobně Ano", čímž se přes převodní křivku přepočítá původní hodnota uzlu $P(E)$ z hodnoty 0,90 na hodnotu uzlu $P(E/X)$ rovnu 0,97. Výsledná přepočítaná hodnota se odvíjí od typu odpovědi a od výchozí hodnoty pravděpodobnosti uzlu $P(E)$.

Povšimněme si, že pokud by uživatel odpověděl "Nevím", hodnota uzlu $P(E)$ by zůstala stejná, což je vyhovující, neboť nechceme, aby neúplnost vstupních dat (v tomto případě neznalost některé z odpovědí) ovlivnila výsledek konzultace.

- **Přepočítání pravděpodobnosti hrany (pravidla)**



Obr. 1.4: Grafické znázornění přepočítání pravděpodobnosti hrany. [1]

Po přepočítání hodnoty uzlu dochází k přepočítání hodnoty pravděpodobnosti pravidla. Převodní křivka na obrázku 1.4 vychází z hodnot výchozích pravděpodobností uzlů $P(E)$ a $P(H)$, které udávají zlom křivky. Krajní body jsou definovány mírou důvěry experta v dané pravidlo (p_1, p_2). Převodní křivka představuje funkci, přes kterou dojde k přepočtu $P(H)$ na $P(H/X)$ na základě přepočítané hodnoty tvrzení $P(E/X)$.

Ukončení konzultace nastává v případě, že aktuální hodnota $P(H_i)$ leží mimo určený vyšetřovaný interval nebo pokud byly všechny otázky již položeny a zodpovězeny nebo pokud si uživatel přeje konzultaci ukončit. [1]

1.6 Aplikace expertních systémů

Expertní systémy mohou být používány nejen pro zastoupení experta, ale také k pomoci s rozhodováním jinému expertovi, který si není svým rozhodnutím jistý nebo

je do jisté míry ovlivňován emocemi, což expertní systém být samozřejmě nemůže. Expertní systémy nacházejí uplatnění v mnoha různých oborech, především tedy v medicíně, ale také v geologii, zemědělství, psychologii, chemii, obchodu, vzdělávání a dalších.

Mezi existující aplikace expertních systémů např. patří:

- **DENDRAL** - Lze jej považovat za první expertní systém vůbec. Byl dokonce implementován dříve, než vznikl pojem "expertní systém". Vznikal v letech 1965 - 1969 na Stanfordské univerzitě a dodnes se rutinně používá, jelikož dosahuje prokazatelně lepších výsledků než skuteční experti. Úkolem tohoto systému je pomáhat při identifikaci chemických sloučenin na základě dat ze spektrometru. [3]
- **PROSPECTOR** - Byl vyvinut v SRI (Stanford Research Institute) a jeho úkolem je na základě jednoduše dostupných geologických dat rozhodovat, zda má smysl v konkrétní lokalitě provádět hloubkové vrty. Neprodleně po prvním formálním testu systém PROSPECTOR upoutal pozornost investorů a veřejnosti, neboť dokázal odhalit molybdenové ložisko v hodnotě sta milionů dolarů, čímž přispěl k výzkumu oblasti expertních systémů jako celku. [3]
- **INTERNIST** (později modifikován a upraven na **CADUCEUS**) - Je považován za jeden z nejrozsáhlejších expertních systémů v historii. Pokrývá údajně 85 % znalostí z oblasti interního lékařství. Dodnes se i přes problémy se svojí značnou mohutností v lékařské komunitě používá. [3]
- **16Personalities** - Jedná se o velice úspěšný expertní systém v oboru psychologie, sloužící pro vyhodnocení osobnostních rysů uživatele. Výsledkem konzultace je určení osobnostního typu uživatele, založeném na modifikovaném pěti faktorovém modelu osobnosti, společně s detailním výpisem analýzy charakteru uživatele.
- **Akinator** - Akinator je expertní systém schopný uhodnout jakoukoliv fiktivní nebo skutečnou osobnost (z filmů, pohádek, knih, internetu, televize atd.), na kterou myslíte. Vyhodnocení probíhá na základě odpovědí na otázky týkající se vzhledu, zemi původu, činech, rodiny, věku, pohlaví nebo charakteristických rysů dané osoby. Expertní systémy tedy najdou své uplatnění i v zábavním průmyslu.

Dalšími používanými expertními systémy z let 1975 - 1984 byly např. **MYCIN**, jehož úkolem bylo určit typ bakteriální infekce pacienta, společně s návrhem vhodné léčby pomocí antibiotik. Systém **PUFF**, který poskytoval konzultace týkající se možných příčin problémů s průchodností dýchacích cest. **CLOT**, který měl za úkol diagnostiku srážlivosti krve. **HEADMED**, který se používal v klinické psychofar-

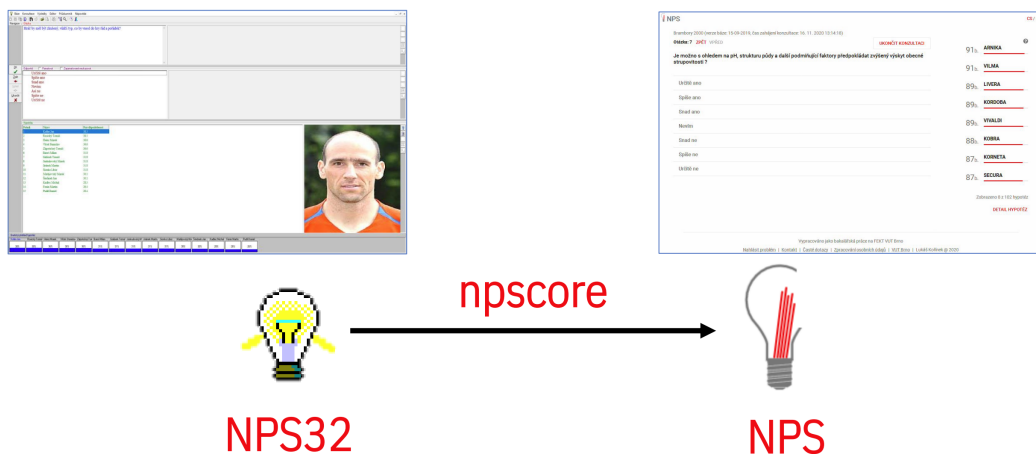
makologii. Nebo systémy **XCON** a **XSEL** užívané firmou DEC, které byly velmi úspěšné a sloužily ke zpracování objednávek zákazníků na počítače řady VAX. Firma DEC vyčíslila úspory dosažené těmito systémy na více než 10 milionů dolarů ročně. [3]

1.6.1 Expertní systém NPS

Systém NPS byl vyvíjen na fakultě FEKT (FEI) a následně upravován studenty. Dnešní forma webového rozhraní NPS byla vyvinuta Ing. Lukášem Kořínkem, který navazoval na práci pana Ing. Michala Krechlera, jenž vytvořil aktuální verzi výpočetního jádra NPS. Je založen na původní počítačové aplikaci NPS32 a programové realizaci výpočetního jádra NPSCore, které bylo původně vyvinuto bez uživatelského rozhraní. [4], [5]

Jedná se o expertní systém, který je využíván v této práci. NPS je diagnostický expertní systém, jehož princip je založen na pravidlech. Jedná se tedy o pravidlový expertní systém, jehož hlavní předností je vysoká míra univerzálnosti, což je zapříčiněno jednoznačně definovanou syntaxí pro báze znalostí. [4]

Na obrázku 1.5 je vyobrazen rozdíl mezi uživatelským rozhraním NPS32 a současným webovým rozhraním NPS.

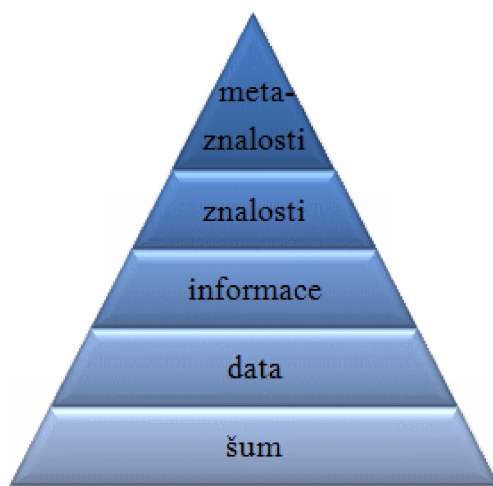


Obr. 1.5: Přejechod z NPS32 na webové rozhraní NPS. [1]

2 Báze znalostí

Báze znalostí je jádrem celé této práce. Jedná se o znalosti a zkušenosti experta, které jsou vhodně uchopeny a zakódovány. Dokud expertnímu systému nedodáme odladěnou bázi znalostí, hovoříme o tzv. prázdném expertním systému. Tyto systémy mají mnohem menší hodnotu, než kdyby obsahovaly odladěnou bázi znalostí.

Nejprve je nutné si uvědomit rozdíly mezi pojmy data, informace a znalosti. K tomu napomůže obrázek 2.1. Data jsou pouze vyfiltrovaný šum. Informace z dat získáme výběrem, určitým zpracováním a přidělením významu. Znalosti jsou informace, které jsou důkladně analyzovány a organizovány tak, aby bylo možné je použít pro řešení určitého problému nebo pro učinění rozhodnutí. Znalosti získáváme učením, zkušenostmi a interakcemi s okolním prostředím. Existují také metaznalosti, což jsou znalosti o znalostech. [1], [4]



Obr. 2.1: Hierarchie znalostí. [1]

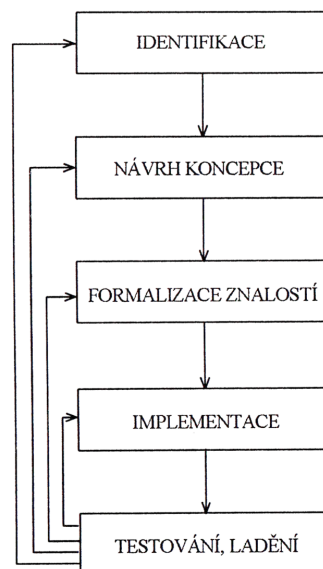
2.1 Znalostní inženýrství

K odladění báze znalostí je zapotřebí experta zabývajícího se danou problematikou. Je obecně známo, že tito nadaní lidé, kteří věnují velkou porci svého života zdokonalování a získávání zkušeností a vědomostí v určitém oboru, jsou velice žádaní a nemají zrovna přebytek volného času. Z tohoto důvodu je často velmi obtížné navrhnout funkční a úplnou bázi znalostí. Problematikou "dolování" znalostí z expertů se zabývá obor znalostní inženýrství.

Znalostní inženýrství se zabývá naplňováním expertních systémů tou nejpodstatnější částí, tedy znalostmi. V tomto oboru je tedy nejvíce zájem o techniky a metody získávání, formalizace, kódování a testování znalostí. [3]

Na ladění báze znalostí musí být kladen velký důraz, neboť od kvality znalostí se odvíjí i kvalita celého expertního systému. Na této tvorbě se tedy podílí jak znalostní inženýr, tak expert. Činnost znalostního inženýra lze shrnout do pěti fází, které jsou i graficky znázorněny na obrázku 2.2. [3]

- **Identifikace problému** - znalostní inženýr se musí nejprve seznámit s problematikou a přesně formulovat problém.
- **Návrh koncepce** - po hlubším seznámení znalostního inženýra s problematikou, se základními pojmy a charakterem dat, za aktivní pomoci experta z dané oblasti, může znalostní inženýr navrhnout konceptuální model organizace relevantních znalostí.
- **Formalizace znalostí** - v tomto kroku provádí znalostní inženýr analýzu konceptuálního modelu z hlediska metod, technik a nástrojů. Volí reprezentaci znalostí a vhodně je formalizuje.
- **Implementace** - výsledkem této fáze činnosti znalostního inženýra je fungující prototyp báze znalostí.
- **Testování, ladění** - tento krok je časově nejnáročnější, jelikož se v něm neustále opakuje cyklus testování, konzultace výsledků s experty a následná úprava báze znalostí.



Obr. 2.2: Fáze činnosti znalostního inženýra. [3]

Z obrázku 2.2 vidíme, že ladění báze znalostí není lineární proces, naopak se opakovaně vracíme k předchozím krokům a iterativně se přibližujeme k nejlepšímu řešení. Jedná se o velmi časově náročnou činnost. Každý z těchto kroků vyžaduje opakovaná setkání znalostního inženýra s expertem, čímž se časová náročnost ještě zvyšuje. [3]

2.1.1 Znalostní inženýrství v praxi

Při návrhu a ladění báze znalostí ve spolupráci s expertem se mi osvědčila jedna z metod uvedených v knize [3] Umělá inteligence (2), ve které si na malé papírky zaznamenáte všechny výsledné hypotézy, na kterých jste se s expertem dohodli a rozmístíte je všechny na stůl tak, aby na ně šlo neustále vidět. Urychluje se tím dorozumívání mezi expertem a znalostním inženýrem a pomáhá to lépe a rychleji formulovat otázky do báze znalostí. Další výhodou této metody je, že při konzultaci s expertem nastává menší pravděpodobnost opomenutí hypotézy nebo otázky související s některou z hypotéz.

Postup

Ze všeho nejdříve je nutné si vybrat téma, na které bude báze znalostí zaměřena. Důležité je uvědomit si skutečnost, že některé problémy se nemusejí nebo nedají řešit pomocí expertních systémů. Často se při výběru tématu stane, že daná problematika lze vyřešit pouhým filtrem, tudíž by použití expertního systému bylo zbytečně složité a ztrácelo by smysl.

Po výběru tématu si znalostní inženýr musí najít experta v daném oboru, který bude ochoten na tvorbě báze znalostí spolupracovat. To může být v některých případech jedna z nejtěžších částí, jelikož tvorba je velmi časově i mentálně náročná pro obě zúčastněné strany.

Pokud najdete vhodného experta a domluvíte si s ním schůzku, je potřeba dané osobě blíže vysvětlit koncept expertních systémů a báze znalostí, čímž pomůžete expertovi nad problémem přemýšlet ze správného úhlu pohledu. To lze provést nejlépe kombinací teorie a názorné ukázky.

V tomto momentě je vhodné, aby si znalostní inženýr nechal potvrdit expertem svou domněnku, že vybraná problematika je řešitelná pomocí expertního systému. Dá se tak předejít pozdějšímu nepříjemnému uvědomění, že není.

Před tvorbou otázek do báze znalostí se musí nejprve určit výsledné hypotézy, jelikož chceme při tvorbě otázek vědět, za jakým účelem je budeme pokládat. Chceme

totiž neustále přemýšlet nad tím, jaké hypotézy mají být po položení dané otázky ovlivněny. Znalostní inženýr by se v této části tvorby měl experta čas od času zeptat, zda nejsou některé dotazované otázky kladeny zbytečně, což může pomoci s nadbytečným množstvím výsledných otázek. Inženýr by si také měl na základě znalostí od experta udržovat přehled o tom, zda jsou některé z otázek podmíněny na základě odpovědí jiných a tuto skutečnost si zaznamenat pro budoucí kódování.

S každou vytvořenou otázkou musí vzniknout i možné odpovědi. Ty by měly zahrnovat všechny možnosti, aby v odpovědích nenastala žádná slepá místa. Také je důležité, aby každá odpověď měla na některou z hypotéz vliv (kromě odpovědi typu "Nevím").

U každé vytvořené odpovědi by se znalostní inženýr měl experta zeptat, jakou hypotézu tato odpověď ovlivňuje a s jakou vahou. To, jak budou jednotlivé odpovědi ovlivňovat výsledné hypotézy, se velmi dobře určuje porovnáváním. Inženýr přiřadí jedné z odpovědí výchozí úroveň (váhu) a z této úrovně poté vychází. Například se může experta zeptat: „*Ovlivní odpověď B danou hypotézu méně nebo více než odpověď A?*“ Tím znalostní inženýr získá přehled o váze všech odpovědí relativně vůči ostatním odpovědím na danou otázku. Poté stačí určit váhy odpovědí napříč všemi otázkami, na základě znalostí o důležitosti všech pokládaných dotazů.

Vhodným zaznamenáním všech poznámek o vytvořené bázi znalostí (doporučuji formou tabulek) se může znalostní inženýr ponořit do samotného kódování báze. Tím ovšem tvorba báze znalostí nekončí. Jak bylo již řečeno, nejedná se o lineární činnost, neboť báze se musí testovat a ladit, aby byla funkční. Testování je vhodné přenechat expertovi nebo ideálně více expertům, kteří mohou znalostního inženýra upozornit na možné chyby a nedostatky.

Chtěl bych poznamenat, že je samozřejmě možné postupovat úplně jiným způsobem. Tento postup pouze vychází z mých zkušeností znalostního inženýrství, které jsem v průběhu tvorby báze znalostí získal. Také chci podotknout, že znalostní inženýr by se měl s probíranou problematikou seznámit nejen prostřednictvím experta, ale také svou vlastní rešerší (přednášky, semináře, knihy, internet...).

2.2 Syntaxe báze znalostí

Pro zápis báze znalostí ve webovém rozhraní expertního systému NPS se používá rozšiřitelný značkovací jazyk XML.

Báze znalostí se dělí na hlavičku (**head**) a tělo báze (**body**), které se skládá z jednotlivých uzlů (**node**).

Hlavička báze znalostí obsahuje informaci o verzi báze (**version**), počet výchozích odpovědí (**default_answers**), název báze (**name**), identifikátor báze (**identifier**), jazyk, ve kterém je báze napsána (**culture**) a popis báze znalostí (**description**). [4]

Výpis 2.1: Ukázka hlavičky báze znalostí.

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<knowledge_base version="1.0">
  <head default_answers="3">
    <name>
      <content culture="cs-CZ" type="text">
        Diagnostika ektázie rohovky
      </content>
    </name>
    <identifier>xsiska17</identifier>
    <cultures>
      <culture>cs-CZ</culture>
    </cultures>
    <description>
      <content culture="cs-CZ" type="text">
        Báze znalostí slouží k určení diagnózy
        ektatických onemocnění rohovky.
      <br/>
      </content>
    </description>
  </head>
```

Klíčové slovo **default_answers** udává počet a typ předem definovaných odpovědí. V tabulce 2.1 vidíme, jak se výchozí odpovědi a jejich hodnoty nastaví s tímto parametrem. Hodnoty ovlivňují přepočítání uzlů a hran. Tyto odpovědi se zobrazují pouze v případě, že nejsou definovány jiné. [4], [5]

Tělo báze znalostí je tvořeno dílčími uzly. Uzel (**node**) s sebou nese vnitřní identifikátor (**literal**), výchozí pravděpodobnostní hodnotu (**probability**) a typ (**type**).

Text odpovědi	Počet odpovědí					
	3		5		7	
Ano	100 %	+1	-	-	-	-
Určitě ano	-	-	100 %	+2	100 %	+3
Spíše ano	-	-	-	-	75 %	+2
Snad ano	-	-	66.7 %	+1	60 %	+1
Nevím	50 %	0	50 %	0	50 %	0
Así ne	-	-	33.3 %	-1	40 %	-1
Spíše ne	-	-	-	-	25 %	-2
Určitě ne	-	-	0 %	-2	0 %	-3
Ne	0 %	-1	-	-	-	-

Tab. 2.1: Výchozí odpovědi expertního systému NPS. [1]

Obsahuje-li uzel parametr (`comment`), nachází se v něm obsahový blok (`content`), ve kterém nalezneme text vyjadřující odpověď nebo otázku. [4], [5]

Výpis 2.2: Ukázka uzlu báze znalostí.

```
<node literal="Vrchol" probability="50.00" type="query">
  <comment>
    <content culture="cs-CZ" type="text">
      Shoduje se vrchol rohovky s nejtenčím
      místem rohovky?
    <br/>
  </content>
</comment>
<contexts>
  <less threshold="50.00" literal="Centr550"/>
</contexts>
</node>
```

Uzly mohou být různého typu [1], [4], [5] :

- **Pomocný uzel** (*ancillary*) - Slouží pro mezivýpočty a obsahuje pravidla vazeb na jiné uzly. Často se používá v kombinaci s dotazovatelnými kvantitativními uzly.
- **Cílový uzel** (*hypotesis*) - Jedná se o cílovou hypotézu, která v sobě obsahuje pravidla, podle kterých se bude hodnota tohoto uzlu měnit.
- **Dotazovatelný přímý uzel** (*query*) - Slouží pro definování otázky, obsahuje její znění a také možné odpovědi v části *answer*. Hodnota uzlu se změní podle pravděpodobnosti zvolené odpovědi.
- **Dotazovatelný kvantitativní uzel** (*query_quantitative*) - Vhodný pro alternativní definici otázky. Stejně jako přímý uzel obsahuje text otázky. Po jeho zodpovězení dojde k nastavení pravděpodobnostní hodnoty daného pomocného uzlu, reprezentujícího odpověď, na hodnotu 100 (*probability="100.00"*).

Všechny tyto uzly mohou mezi sebou mít definované vazby (*relationships*), které ovlivňují výsledné pravděpodobnostní hodnoty pozitivně (*positive*) nebo negativně (*negative*). Do dotazovaných uzlů lze přidat kontexty (*contexts*), u kterých nastavujeme, zda se má dotaz položit, pokud je hodnota určitého uzlu nad nebo pod (*greater/less*) definovanou hodnotou (*threshold*). Pravidla určují vztahy mezi uzly, definujeme je pomocí klíčových slov *conjunction* nebo *disjunction*. [1]

3 Oftalmologie

Báze znalostí v této práci je zaměřena na diagnostiku ektatických onemocnění rohovky (viz kapitola 3.3), což spadá do oblasti oftalmologie.

Oftalmologie neboli oční lékařství je medicínský obor zabývající se diagnostikou a léčbou očních poruch a onemocnění. [9]

3.1 Rohovka

Rohovka neboli cornea je transparentní tkáň tvořící mechanickou a chemickou bariéru, která spolu se sklérou tvoří zevní obal oka. Jedná se o avaskulární tkáň s velkým množstvím volných nervových zakončení, která se skládá z pěti vrstev. [12], [13]

První (vnější) vrstvou rohovky je tzv. epitel, který se skládá ze čtyř až šesti vrstev. Epitel má rychlou schopnost regenerace a představuje až 10 % tloušťky rohovky. Druhou vrstvou je velice tenká Bowmanova membrána, která na rozdíl od epitelu nemá schopnost regenerace a její porušení vede k tvorbě rohovkové jizvy. Prostřední vrstvou rohovky je tzv. stroma, které tvoří až 90 % tloušťky rohovky. Stroma je tvořeno pravidelně uspořádanými kolagenními fibrilami a jeho regenerační schopnost je velmi malá. Čtvrtou vrstvou je pevná Descemetova membrána tvořená mřížkou kolagenních fibril, se schopností regenerace. Poslední vrstvou je velice tenký jednovrstevný endotel udržující konstantní optickou mohutnost rohovky. Endotelových buněk s věkem ubývá a nemají schopnost regenerace. [12], [13]

Hlavní funkcí rohovky je průchod světelných paprsků do oka. Optická mohutnost rohovky je přibližně 43 dioptrií (D). Centrální část rohovky má tloušťku průměrně 550 μm , zatímco periferie rohovky má tloušťku 650 - 1000 μm . Standardní lidská rohovka je tvarově sférická v centrální části, postupně se oplošťuje v paracentrální části a nejplošší je v periférii rohovky. [12]

3.2 Vyšetření rohovky

Značná část odpovědí na dotazy, které se v navržené bázi znalostí nacházejí, musí být získána měřením parametrů rohovky. Tyto parametry lze měřit širokou škálou přístrojů. K vyšetření rohovky se používají oftalmologické přístroje a metody, spadající do skupiny určené k měření předního segmentu oka. [14]

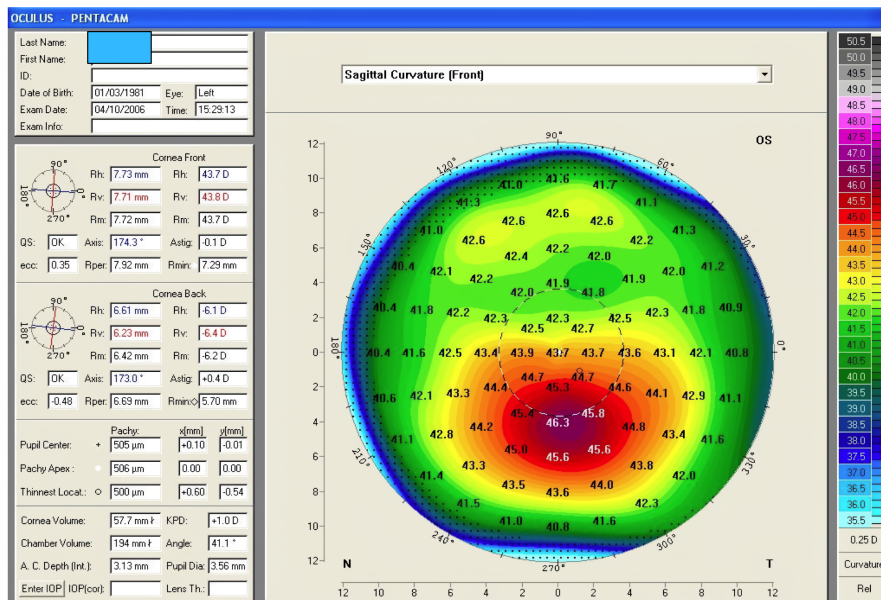
3.2.1 Keratometr

Jedná se o přístroj určený k měření zakřivení přední plochy rohovky. Lze jím zjistit i hodnotu optické mohutnosti rohovky, která není tímto přístrojem přímo změřena, ale ve skutečnosti je vypočítána z hodnot zakřivení vyšetřované plochy. Typů keratometrů je mnoho, jsou ovšem založeny na obdobném principu. Využívají rohovku jako konvexní zrcadlo, na které je promítána dvojice značek, jejichž odraz je pozorován vyšetřovací soustavou. Ze vzájemného rozestupu odražených značek lze následně dospět k hodnotám poloměru zakřivení přední plochy rohovky. Měření probíhá v konstantní vzdálenosti od oka. [14], [12]

3.2.2 Topografie rohovky

Vyšetření je založeno na principu Placidova disku. Provádí se promítání soustředných kružnic na přední plochu rohovky, která se opět chová jako konvexní zrcadlo, přičemž je pozorován odraz těchto kružnic. Pokud má rohovka nepravidelnosti v zakřivení, dojde k deformaci odražených kružnic. Jedná-li se například o rohovku s astigmatismem, budou se odražené kružnice jevit jako elipsy. [14], [12]

Moderní počítačové rohovkové topografy vytvářejí z naměřených hodnot topografické mapy. Naměřené hodnoty jsou převedeny do barevné škály a výsledkem je přehlednější barevná mapa reprezentující obraz zakřivení jednotlivých částí rohovky. [14], [12]



Obr. 3.1: Ukázka topografické mapy z přístroje PENTACAM. [12]

Analyzátor předního segmentu

V posledních letech jsou tyto komplexní přístroje, které zahrnují hned několik vyšetřovacích metod, uváděny na trh některými firmami, jako například PENTACAM od firmy Oculus. Jedná se o kombinaci elektroniky, optiky, mechaniky a výpočetní techniky. Přístroj umožňuje rychlou a bezkontaktní analýzu celého předního segmentu oka. Tyto přístroje jsou ovšem velmi nákladné a tudíž jsou používány méně než ostatní uvedené přístroje. [14]

3.2.3 Pachymetrie

Jedná se o metodu určenou k měření tloušťky rohovky. Měří se buď opticky nebo pomocí ultrazvuku. U obou měřících metod se využívá odrazu akustické nebo optické vlny od zadní plochy rohovky. Měření pachymetrie se provádí buď v celé ploše rohovky nebo bodově, nejčastěji ve středu rohovky, kde bývá rohovka nejtenčí. [14]

3.2.4 Bezkontaktní tonometr

Tonometrie v oftalmologii znamená měření nitroočního tlaku. Bezkontaktní tonometr využívá tlaku proudu vzduchu, díky kterému dochází k oploštění (aplanaci) centra rohovky. Aplanace je vyhodnocována optickým snímačem, na které dopadá světlo odražené od rohovky. [14]

3.2.5 Štěrbinová lampa

Štěrbinová lampa je základní součástí vybavení oftalmologických vyšetřoven. Slouží k objektivnímu pozorování a vyšetřování oka, zejména rohovky. Nejčastěji se využívá pro vytvoření obecného přehledu o celkovém stavu předního segmentu oka a víček. Skládá se z binokulárního mikroskopu, mechanického systému pro přesné nastavení přístroje a osvětlovacího systému s možností regulace intenzity, šířky a směru osvětlení. [14]

Existuje velké množství technik vyšetření štěrbinovou lampou, které se mezi sebou liší např. nastavením parametrů lampy nebo použitím difúzních filtrů. Tyto techniky slouží k vyšetřování různých struktur a kvality předního segmentu. [12], [14]

3.3 Ektázie rohovky

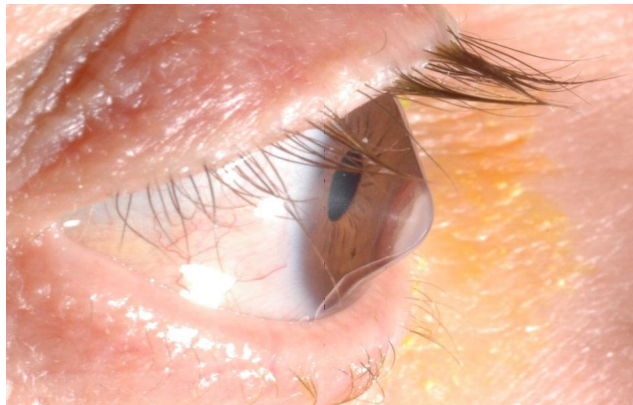
Ektázie rohovky jsou rohovkové degenerace, které jsou spojeny se ztenčováním, protruzí a jizvením rohovky. Jedná se o nezánetlivá onemocnění keratokonus, keratoglo-

bus a pelucidní marginální degenerace. Jde o multifaktoriální onemocnění způsobené kombinací genetických a vnějších vlivů. Pacientům trpícím ektatickými onemocněními rohovky se nedoporučuje podstupovat laserové refrakční zákroky, vzhledem k špatně předvídatelnému efektu a riziku, že zákrok vyvolá progresivní zhoršení ektázie. [6], [8], [10], [11]

3.3.1 Keratokonus

Keratokonus je nezánetlivé, oboustranné a asymetrické onemocnění, při kterém dochází k progresivnímu ztenčování a vyklenování rohovky. Vyklenování rohovky probíhá nejčastěji v paracentrální části, méně často i v centrální části rohovky. Změna tvaru rohovky vede ke vzniku nepravidelného astigmatismu a ke snížení zrakové ostrosti. U keratokonu dochází k histopatologickým změnám všech vrstev rohovky, nejvýrazněji v centrální části. [7]

Keratokonus se považuje za geneticky podmíněné onemocnění a může doprovázet jiná genetická onemocnění, jako je např. Downův syndrom, Leberova vrozená amauroza nebo Ehlers-Danlosův syndrom. Rozvoj keratokonu je až 67krát větší u jedince s pozitivní rodinou anamnézou než bez ní. Keratokonus je spojen se zvýšením markerů oxidačního stresu a poklesem antioxidantů. Jako hlavní rizikový faktor je udáváno tření očí, kdy dochází k mechanickému poškození rohovky. Často bývá keratokonus spojován i s alergiemi a atopiemi. [7]



Obr. 3.2: Keratokonus. [11]

Řadí se mezi degenerativní nezánetlivá onemocnění rohovky s pomalou progresí, které se projevuje zvýšenou nepravidelostí rohovky a zhoršením jejích optických vlastností, což často vede k závažnému snížení zrakové ostrosti pacienta. Na každém oku se téměř vždy vyskytuje v různých vývojových stádiích. Keratokonus se

klasifikuje podle Amslera a Krumeicha do čtyř stupňů dle závažnosti. Onemocnění se nejčastěji projeví ve druhé a třetí dekádě života, kdy lze také zaznamenat největší progresi. S postupujícím věkem se onemocnění zpravidla stabilizuje, přičemž po dosažení věku čtyřiceti let, dochází ke zhoršování jen vzácně. [6], [11]

Keratokonius prvního stupně

- rohovka je zatím protenčena velmi málo
- prvním příznakem je nepravidelný astigmatismus
- nepřítomnost jizvení
- ostrost zraku je poměrně velmi dobrá
- apex (vrchol keratokoniu) může být mírně zašedlý [15]

Keratokonius druhého stupně

- přítomnost patologických příznaků zahrnující Vogtovy strie, trhliny Descemetovy membrány či Fleischerův prstenec
- s pomocí brýlí nebo kontaktních čoček lze dosáhnout dobrého vidění [15]

Keratokonius třetího stupně

- nastává snížená transparentnost rohovky
- většina patologických příznaků je zřetelně viditelná [15]

Keratokonius čtvrtého stupně

- ostrost zraku s brýlemi je velmi špatná
- aplikací kontaktních čoček nelze dosáhnout dobrého vidění
- rohovka je zakalena
- přítomnost patologických příznaků [15]

Keratokonius nízkého stupně lze korigovat brýlemi nebo pomocí měkkých či tvrdých kontaktních čoček. V momentě, kdy dochází k další progresi vyklenutí, by měl pacient zvážit možnost dostupných chirurgických postupů, jako např. Corneal cross linking či transplantaci rohovky - tzv. keratoplastiku. [6], [12]

Zde jsou uvedeny rysy keratokoniu, na které se dotazuje navržená báze znalostí:

- **Fleischerův prstenec** - vzniká ukládáním železa v periferii rohovky okolo protenčeného místa. Lze ho pozorovat pomocí štěrbinové lampy. Má šedé, hnědé nebo nažloutlé zbarvení. [15], [16]

- **Vogtovy strie** - vytvářejí se v oblasti protěžení vrcholu rohovky. Lze při nich pozorovat vertikálně či šikmo uspořádané trhliny v Descemetově membráně. [15], [17]
- **Hydrops** - obvykle pozorovatelný u vyššího stupně keratokonu. Jedná se o akutní edém rohovky, který je způsoben spontánní rupturou Descemetovy membrány a následným prosáknutím vody do stromatu rohovky, což vede k otoku. Dochází k zakalení rohovky a k náhlému poklesu zrakové ostrosti. Vytvoří-li se na rohovkovém epitelu puchýře, je tento stav doprovázen velkou mírou bolestivosti. [15], [17]

3.3.2 Keratoglobus

Jedná se o velmi vzácné, nezánětlivé, bilaterální (výskyt na obou očích) ektatické onemocnění, které se často vyskytuje hned po narození. Keratoglobus zpravidla není progresivní nebo progreduje jen minimálně. Onemocnění je charakteristické ztenčením a difuzní protruzí rohovky, což vede k jeho typickému vyklenutí kulovitěho tvaru. Ztenčení rohovky je obvykle největší v periferii rohovky a může dosahovat až jedné pětiny její normální tloušťky. Keratoglobus bývá spojován s poruchami pojivové tkáně jako např. Marfanův syndrom. U keratoglobu může docházet k tvorbě jizev, případně akutního hydropsu a nedochází k výskytu Fleischerova prstence. Stejně jako u keratokonu i u keratoglobu dochází k výskytu nepravidelného astigmatismu, který způsobuje významné zhoršení vidění. V léčbě je vyvíjena snaha o optimální korekci pomocí brýlí nebo tvrdých kontaktních čoček. Jednotný chirurgický postup není dán, vzhledem k vysokému riziku pooperačních komplikací. [6], [8]



Obr. 3.3: Keratoglobus. [12]

3.3.3 Pelucidní marginální degenerace

Pelucidní marginální degenerace je oboustranná periferní nezánětlivá ektázie rohovky, která je charakteristická vyklenutím její periferní části, nejčastěji v dolních kvadrantech. Ve srovnání s keratokonem začíná pelucidní marginální degenerace v pozdějším věku, někdy mezi 20. a 50. rokem života a progreduje pomalejším tempem. Projevuje se vznikem nepravidelného a nekorigovatelného astigmatismu. Léčba této nemoci je složitá, v úvahu přicházejí různé typy speciálních čoček nebo periferní lamelární keratoplastika, případně klínová keratektomie. [6], [11]

4 Návrh a ladění báze znalostí

Tato kapitola shrnuje výsledek mé bakalářské práce, kterého bylo dosaženo ve spolupráci s expertem Mgr. Hanou Řehákovou.

V bázi znalostí jsem si zvolil počet výchozích odpovědí roven třem. Tyto výchozí odpovědi vychází z tabulky 2.1, tedy „Ano”, „Nevím”, „Ne”. Vzhledem k povaze otázek a odpovědí bylo potřeba vytvořit také mnoho dotazovatelných kvantitativních uzlů, které s určitou nastavenou vahou ovlivňují výsledné hypotézy.

4.1 Hypotézy

Navržená báze znalostí má šest hlavních hypotéz, na které je primárně zaměřena a jednu doplňující:

- **Hlavní hypotézy**
 - Keratokonus 1. stupně
 - Keratokonus 2. stupně
 - Keratokonus 3. stupně
 - Keratokonus 4. stupně
 - Keratoglobus
 - Pelucidní marginální degenerace

- **Doplňující hypotéza**
 - Normální rohovka s astigmatismem

4.2 Pokládání otázky a možné odpovědi

Báze znalostí se skládá ze čtrnácti otázek, z toho čtyři jsou podmíněné:

1. **Pocítuje pacient zhoršení vidění?**
 - Pocítuje výrazně na jednom oku
 - Pocítuje výrazně na obou očích
 - Pocítuje na jednom oku
 - Pocítuje na obou očích
 - Nepocítuje
 - Nevím
2. **V jakém období života se začaly vyskytovat problémy?**
 - 0 - 10 let
 - 10 - 20 let
 - 20 - 30 let

- 30 - 40 let
 - Nad 40 let a více
 - Nevím
- 3. Jaký je refrakční stav oka?**
- Hypermetropie
 - Myopie
 - Nezměřeno (Nevím)
- 4. Výskyt celkového astigmatismu?**
- Výskyt vyššího astigmatismu (větší než 2 D)
 - Výskyt nižšího astigmatismu (menší než 2 D)
 - Nepravidelný astigmatismus
 - Nezměřeno (Nevím)
- 5. Jaký je vzhled topografické mapy?**
- Klepeta (měsíc)
 - Ovál v centrální části
 - Ovál v dolní paracentrální části
 - Kruh
 - Přesýpací hodiny (tvar osmičky)
 - Vyklenutí v celé šíři
 - Nezměřeno (Nevím)
- 6. Jaká je tloušťka centrální části rohovky?**
- Méně než 200 μm
 - 200 - 300 μm
 - 300 - 450 μm
 - 450 - 530 μm
 - Více než 530 μm
 - Nezměřeno (Nevím)
- 7. Ztenčení periferie rohovky?**
- Ano
 - Nevím
 - Ne
- 8. Shoduje se vrchol rohovky s nejtenčím místem rohovky?**
- Ano
 - Nevím
 - Ne
- 9. Jaký je poloměr zakřivení přední plochy rohovky?**
- Méně než 5,8 mm
 - 5,8 - 6,5 mm
 - 6,5 - 7,2 mm

- 7,2 - 7,5 mm
- Více než 7,5 mm
- Nezměřeno (Nevím)

10. **Jaká je optická mohutnost rohovky?**

- Méně než 43 D
- 45 - 49 D
- 49 - 53 D
- 53 - 55 D
- 55 - 60 D
- Více než 60 D
- Nezměřeno (Nevím)

11. **Vyskytuje se na rohovce Fleischerův prstenec?**

- Ano
- Nevím
- Ne

12. **Vyskytují se na rohovce Vogtovy strie?**

- Ano
- Nevím
- Ne

13. **Vyskytuje se na rohovce hydrops?**

- Ano
- Nevím
- Ne

14. **Dochází k progresi vyklenutí rohovky?**

- Ano
- Nevím
- Ne

Příčemž podmíněnými otázkami jsou dotazy číslo 2, 8, 13 a 14.

Na otázku „V jakém období života se začaly vyskytovat problémy?“ se nebudeme ptát, pokud pacient na předchozí otázku odpověděl, že nepocítuje zhoršení vidění.

Je-li na otázku týkající se tloušťky centrální části rohovky odpovězeno v normě, tedy více než 530 μm , nemusíme se dotazovat, zda se vrchol rohovky shoduje s jejím nejtěnějším místem.

Pokud se na rohovce nevyskytují Vogtovy strie, nebudeme pokládat otázku, zda se na ní vyskytuje hydrops.

Bylo by také zbytečné se ptát, zda dochází k progresi vyklenutí rohovky, pokud tloušťka centrální části rohovky vychází v normě, jelikož by při normální tloušťce rohovky nedošlo k vyklenutí.

4.3 Výsledná báze znalostí

Výsledek mé práce ve spolupráci s expertem je přehledně zaznamenán v tabulce 4.1. Do této tabulky jsem uvedl otázky, odpovědi, hypotézy a vazby mezi jednotlivými odpověďmi a hypotézami. Je zde také uvedena i odladěná váha vazeb, se kterou jsou hypotézy ovlivňovány.

V tabulce 4.1 jsou hypotézy označeny formou zkratk:

- AR - Normální rohovka s astigmatismem
- PMD - Pelucidní marginální degenerace
- K1 - Keratokonus 1. stupně
- K2 - Keratokonus 2. stupně
- K3 - Keratokonus 3. stupně
- K4 - Keratokonus 4. stupně
- KG - Keratoglobus

č.	Otázky	Odpovědi	Hypotézy						
			AR	PMD	K1	K2	K3	K4	KG
1	Pocítuje pacient zhoršení vidění?	Pocítuje výrazně na jednom oku				+35	+35	+35	
		Pocítuje výrazně na obou očích				+20	+20	+20	
		Pocítuje na jednom oku			+35				
		Pocítuje na obou očích		+35	+20				
		Nepocítuje	+30						+30
2	V jakém období života se začaly vyskytovat problémy?	Nevím							
		0 - 10 let	+30						+30
		10 - 20 let			+30	+30	+30	+30	
		20 - 30 let		+20	+30	+30	+30	+30	
		30 - 40 let		+30	+20	+20	+20	+20	
		Nad 40 let a více		+30					
3	Jaký je refrakční stav oka?	Nevím							
		Hypermetropie	+10	+20	+10	+10	+10	+10	+10
		Myopie	+10	+10	+35	+35	+35	+35	+30
4	Výskyt celkového astigmatismu?	Nezměřeno (Nevím)							
		Výskyt vyššího astigmatismu (větší než 2 D)	+30		+30	+30	+30		
		Výskyt nižšího astigmatismu (menší než 2 D)	+30		+30				
		Nepravidelný astigmatismus		+30			+30	+30	+30
5	Jaký je vzhled topografické mapy?	Nezměřeno (Nevím)							
		Klepetá (měsíc)		+35	+20	+20	+20	+20	
		Ovál v dolní části	+20	+30					
		Ovál v dolní paracentrální části			+30	+30	+30	+30	
		Kruh			+30	+30	+30	+30	+30
		Přesýpací hodiny (tvar osmičky)	+30		+30	+30	+30	+30	
6	Jaká je tloušťka centrální části rohovky?	Vyklenutí v celé šíři							+35
		Nezměřeno (Nevím)							
		Méně než 200 µm	-15					+30	+15
		200 - 300 µm	-15				+30		+15
		300 - 450 µm		+30		+30			+20
		450 - 530 µm	+30	+30	+30				
7	Ztenčení periferie rohovky?	Více než 530 µm	+30				-12	-15	
		Nezměřeno (Nevím)							
		Ano	-20	-20	-20	-20	-20	-20	+40
8	Shoduje se vrchol rohovky s nejtenčím místem rohovky?	Ne	+20	+20	+20	+20	+20	+20	-40
		Nevím							
		Ano		-30	+30	+30	+30	+30	
9	Jaký je poloměr zakřivení přední plochy rohovky?	Ne	+30	-30	-30	-30	-30	-30	
		Nevím							
		Méně než 5,8 mm	-15		-15	-12		+30	
		5,8 - 6,5 mm	-12		-12		+30		
		6,5 - 7,2 mm	-7		+20	+30			
		7,2 - 7,5 mm	+30		+20	-10	-12	-15	
10	Jaká je optická mohutnost rohovky?	Více než 7,5 mm	+30		-7	-10	-12	-15	
		Nezměřeno (Nevím)							
		Méně než 45 D	+30						
		45 - 49 D	+30	+30	+30		-12	-15	
		49 - 53 D		+30		+30		-12	
		53 - 55 D		+30	-12		+30		+30
11	Vyskytuje se na rohovce Fleischerův prstenec?	55 - 60 D			-15	-12		+30	+30
		Více než 60 D							+30
		Nezměřeno (Nevím)							
12	Vyskytuje se na rohovce Vogtovy strie?	Ano	-20	-35	-20	+35	+20	+20	-20
		Ne	+20	+35	+20	-35	-20	-20	+20
		Nevím							
13	Vyskytuje se na rohovce hydrops?	Ano	-30	+20	-30	+20	+30	+35	+15
		Ne	+30	-20	+30	-20	-30	-35	-15
		Nevím							
14	Dochází k progresi vyklenutí rohovky?	Ano	-30	+30	-30	-35	+30	+35	+20
		Ne	+30	-30	+30	+35	-30	-35	-20
		Nevím							
14	Dochází k progresi vyklenutí rohovky?	Ano	-30	+20	+30	+30	+30	+30	-30
		Ne	+30	-20	-30	-30	-30	-30	+30
		Nevím							

Tab. 4.1: Tabulka navržené báze znalostí včetně vah vazeb.

4.4 Zhodnocení dosažených výsledků

Po návrhu, realizaci a samotném odladění výsledné báze znalostí je v této kapitole uvedeno zhodnocení dosažených výsledků.

4.4.1 Testování

Bylo provedeno testování, respektive ověření funkčnosti, navržené báze znalostí na reálných datech ve spolupráci s expertem. Během tohoto testu byly otázky pokládané expertním systémem zodpovězeny podle skutečných naměřených parametrů a stavu rohovky. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 4.2.

Pacient č.	Diagnóza odborníkem	Pomocná diagnóza expertního systému	Úspěch
1	Keratokonus 2. stupně	Keratokonus 1. stupně / Keratokonus 2. stupně	✓
2	Keratokonus 1. stupně	Keratokonus 1. stupně	✓
3	Normalní rohovka s astigmatismem	Normalní rohovka s astigmatismem	✓
4	Keratokonus 2. stupně	Keratokonus 2. stupně	✓
5	Keratokonus 1. stupně	Keratokonus 1. stupně	✓
6	Keratoglobus	Keratoglobus	✓
7	Normalní rohovka s astigmatismem	Normalní rohovka s astigmatismem	✓
8	Zatím nediodagnostikováno	Keratoglobus / Keratokonus 1. stupně	?
9	Keratokonus 3. stupně	Keratokonus 2. stupně / Keratokonus 3. stupně	✓
10	Pelucidní marginální degenerace	Pelucidní marginální degenerace	✓

Tab. 4.2: Výsledky ověření funkčnosti báze znalostí.

U některých diagnóz jsou uvedeny dvě hypotézy, což je zapříčiněno téměř shodnými výslednými hodnotami u obou hypotéz. U jednoho z pacientů zatím ještě nedošlo k odborné diagnóze rohovkovou poradnou, tudíž není prozatím možné posoudit úspěch této konkrétní diagnózy expertního systému. Také je vhodné podotknout, že v testovací množině se nenacházel nikdo, komu by byl diagnostikován keratokonus 4. stupně.

Výsledky tohoto ověření funkčnosti jsou úspěšné, je tedy možné konstatovat, že navržená báze znalostí je schopná pomoci expertům při diagnostice ektatických onemocnění rohovky. Jsem si vědom, že aby bylo testování v tomto medicínském oboru plnohodnotné, muselo by probíhat ve větším měřítku. Pro účely této bakalářské práce jsou ovšem výsledky dle mého názoru zcela dostačující.

4.4.2 Využití

Báze znalostí může nalézt velké využití v optikách u optometristů, kteří by na základě výsledné hypotézy své pacienty posílali do rohovkové poradny. Dále může být

využívána oftalmology pro kontrolu svých rozhodnutí při diagnostice rohovky oka nebo také oftalmology, kteří se přímo nespécializují na rohovku.

Výhodou navržené báze znalostí je, že odpovědi na pokládané otázky lze získat pomocí široké škály přístrojů. To znamená, že není závislá na jednom konkrétním přístroji, což ji dělá více univerzální.

4.4.3 Porovnání s konkurencí

Provedl jsem rešerši týkající se již existujících expertních systémů s podobnou bází znalostí. Některé z nich se zaměřují na problémy s okem příliš obecně, expertní systém tedy sice obsahuje velké množství hypotéz, ovšem žádnému problému se nevěnuje více do hloubky. Tento nedostatek je možné pozorovat např. u expertního systému ESMDA [18], který je ale zaměřený spíše na celkovou lékařskou diagnostickou pomoc, než pouze na rohovku či oko.

Jiným problémem u těchto podobných expertních systémů je binární povaha výsledku. Expertní systémy [19], [20] jsou zaměřeny na keratokonus, ovšem možné výsledné hypotézy jsou pouze dvě - na rohovce se vyskytuje keratokonus nebo nevyskytuje. Jedná se tedy spíše o typ filtru. U obou těchto případů nedochází k rozdělení keratokonu na stupně dle závažnosti, což navržená báze znalostí *Rohovka* umí. Rozdělení keratokonu na stupně samozřejmě nemusí být v některých aplikacích vyžadováno.

Při průzkumu jsem nenašel žádnou bázi znalostí pro expertní systém, která by měla shodnou funkci jako výsledek této práce, čímž ale netvrdím, že žádná podobná báze znalostí neexistuje. Existuje mnoho expertních systémů s relativně podobnou funkcí, jelikož expertní systémy jsou pro diagnostiku ektatických onemocnění rohovky velmi vhodným nástrojem.

Užitečnou vlastností některých z výše uvedených expertních systémů je automatizace sběru dat z báze dat, která jsou potřebná k vyhodnocení hypotézy. Vyhodnocování hypotéz tedy nemusí u těchto systémů probíhat formou pokládání dotazů uživateli, neboť pouze stačí potřebná data vhodně ukládat do databáze, ze které může expertní systém čerpat a následně je zpracovávat.

V případě aktuální verze expertního systému NPS, pro který je báze znalostí v této práci navržena, nemůže být tato úroveň automatizace sběru vstupních dat realizována, jelikož jedinou formou báze dat tohoto expertního systému jsou prozatím

pouze odpovědi od uživatele. V budoucnu by to ovšem mohlo být možné, dojde-li k úpravě vnitřní struktury expertního systému NPS.

Závěr

Výsledkem práce je funkční navržená báze znalostí s názvem *Rohovka*, která je schopná úspěšně diagnostikovat ektatická onemocnění rohovky. Vzhledem k odbornosti otázek a celkového zaměření znalostí, je báze znalostí určena především pro oční lékaře a optometristy, kteří si chtějí ověřit svá rozhodnutí nebo pro studenty obeznámené s touto problematikou za účelem vzdělávání.

V první kapitole byly expertní systémy zařazeny do oblasti umělé inteligence, byly popsány jejich vlastnosti, společně s jejich filozofií a rozdělením. Podrobněji probírala diagnostický expertní systém, jeho vnitřní strukturu, princip a aplikace.

Druhá kapitola se věnovala bázi znalostí a její syntaxi v expertním systému NPS. Rozebírala znalostní inženýrství a postup přesunu znalostí expertů do báze znalostí.

Třetí kapitola byla soustředěna na téma, pro které jsem si vybral tvořit bázi znalostí. Zabývala se rohovkou a možnými způsoby jejího vyšetření. Byla v ní rozdělena ektatická onemocnění rohovky na keratokonus, keratoglobus a pelucidní marginální degeneraci a blíže se jim věnovala.

Navržené bázi znalostí byla věnována čtvrtá kapitola. Byly zde vypsány konečné hypotézy, všechny pokládané dotazy a možné odpovědi. V tabulce 4.1 byly uvedeny hodnoty vazeb mezi těmito uzly. Dosažené výsledky zde byly zhodnoceny formou testování na skutečných datech, možným využitím báze znalostí a porovnáním s již existujícími expertními systémy obdobného zaměření.

Literatura

- [1] JIRSÍK V.: *Expertní systémy - prezentace předmětu BPC-UIN*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2021 [cit. 08. 12. 2022].
- [2] JIRSÍK V.: *Expertní systémy*. Brno: 2003, Habilitační práce. VUT v Brně, FEKT, Ústav automatizace a měřicí techniky.
- [3] MAŘÍK V., ŠTĚPÁNKOVÁ O., LAŽANSKÝ J. a kolektiv: *Umělá inteligence (2)*. Praha: Academia, 1997, s. 15-137. ISBN 80-200-0504-8.
- [4] KOŘÍNEK L.: *Uživatelské rozhraní pro expertní systém*. Brno: 2019, 82 s. Bakalářská práce. VUT v Brně, FEKT, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce: doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
- [5] KRECHLER M.: *Diagnostický expertní systém*. Brno: 2017, 73 s. Diplomová práce. VUT v Brně, FEKT, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce: doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
- [6] STUDENÝ P. a kolektiv: *Keratokonius*. Praha: Maxdorf, Jessenius 2020, edice MEDICA. ISBN 978-80-7345-665-8.
- [7] SANTODOMINGO-RUBIDO J., CARRACEDO G., SUZAKI A., VILLACOLLAR C., VINCENT S. J., WOLFFSOHN J. S.: *Keratoconus: An updated review 2022*, [cit. 04. 16. 2023]. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.clae.2021.101559>>.
- [8] WALLANG B. S., DAS S.: *Keratoglobus*. 2013, [cit. 04. 16. 2023]. DOI: <<https://doi.org/10.1038/eye.2013.130>>.
- [9] *Ophthalmology [online]*. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, [cit. 12. 28. 2022]. Dostupné z URL: <<https://en.wikipedia.org/wiki/Ophthalmology>>.
- [10] *Stroma rohovky [online]*. Jindřichův Hradec: Čočky-kontaktní.cz, [cit. 12. 28. 2022]. Dostupné z URL: <<https://www.cocky-kontaktni.cz/slovník/stroma-rohovky.html>>.
- [11] *Degenerace a dystrofie rohovky [online]*. Praha: WikiSkripta, 24. 10. 2021, [cit. 12. 28. 2022]. ISSN 1804-6517. Dostupné z URL: <https://www.wikiskripta.eu/w/Degenerace_a_dystrofie_rohovky>.

- [12] LANGER P.: *Analýza rohovky - prezentace evropské oční kliniky LEXUM*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, Katedra optiky Přírodovědecké fakulty, 2021 [cit. 03. 19. 2023].
- [13] KUČHYNKA P. a kolektiv: *Oční lékařství 2., přepracované a doplněné vydání*. Praha: 2016, Grada Publishing, a.s., ISBN: 978-80-247-5079-8
- [14] HRAZDIRA I.: *Přehled optických přístrojů v oftalmologii a optometrii [online]*. Brno: Masarykova univerzita, Lékařská fakulta, [cit. 03. 25. 2023]. Dostupné z URL:
<https://www.med.muni.cz/biofyz/files/ucebnice/pristroj_oftalmo.pdf>.
- [15] *Výukové materiály k předmětu Klinická oftalmologie*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, Katedra optiky Přírodovědecké fakulty, 2019
- [16] *Fleischer ring [online]*. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, [cit. 04. 03. 2023]. Dostupné z URL:
<https://en.wikipedia.org/wiki/Fleischer_ring>.
- [17] CHRISTY J. S., TAGARE S.: *Classical signs of Keratoconus*. India, [cit. 04. 03. 2023]. DOI: <<http://dx.doi.org/10.7869/djo.580>>.
- [18] ABU-NASER S., AL-DAHDOO R., MUSHTAHA A., EL-NAFFAR M.: *Knowledge management in ESM DA: expert system for medical diagnostic assistance*. Palestina, 2010, [cit. 04. 08. 2023]. Dostupné z URL:
<<http://dstore.alazhar.edu.ps/xmlui/handle/123456789/425>>.
- [19] MAEDA N., KLYCE S. D., SMOLEK M. K., THOMPSON H. W.: *Automated Keratoconus Screening With Corneal Topography Analysis*. 1994, [cit. 04. 08. 2023]. Dostupné z URL:
<<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/8188468/>>.
- [20] KALIN N. S., MAEDA N., KLYCE S. D., HARGRAVE S., WILSON S. E.: *Automated topographic screening for keratoconus in refractive surgery candidates*. The CLAO Journal: Official Publication of the Contact Lens Association of Ophthalmologists, [cit. 04. 08. 2023]. Dostupné z URL:
<<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/8828931/>>.
- [21] ŠIŠKA J.: *Creation of Knowledge Base*. Brno: 2023, EEICT. VUT v Brně, FEKT, Ústav automatizace a měřicí techniky.

A Příloha - Báze znalostí

V příloženém souboru BP_Rohovka_xsiska17.xml se nachází kód funkční báze znalostí *Rohovka*, sloužící pro diagnostiku ektatických onemocnění rohovky ve webovém rozhraní NPS.