

# Reprezentace a vyvozování znalostí

Aleš Horák

E-mail: [hales@fi.muni.cz](mailto:hales@fi.muni.cz)  
<http://nlp.fi.muni.cz/uui/>

Obsah:

- ▶ Reprezentace a vyvozování znalostí
- ▶ Logika – rezoluční pravidlo
- ▶ Extralogické informace
- ▶ Pravidlové systémy
- ▶ Nejistota a pravděpodobnost

## Reprezentace a vyvozování znalostí

otázka:

*Jak zapíšeme znalosti o problému/doméně?*

*Když je zapíšeme, můžeme z nich mechanicky odvodit nová fakta?*

- ▶ **reprezentace znalostí** (*knowledge representation*) – hledá způsob vyjádření znalostí počítačově zpracovatelnou formou (za účelem odvozování)
- ▶ **vyvozování znalostí** (*reasoning*) – zpracovává znalosti uložené v **bázi znalostí** (*knowledge base, KB*) a provádí **odvození** (inference) nových závěrů:
  - odpovědi na dotazy
  - zjištění faktů, které vyplývají z faktů a pravidel v KB
  - odvodit akci, která vyplývá z dodaných znalostí, ...

# Reprezentace znalostí

proč je potřeba speciální **reprezentace znalostí**?

*vnímání lidí* × *vnímání počítačů*

## ▶ člověk

- ▶ když dostane novou věc (třeba pomeranč) – **prozkoumá** a **zapamatuje** si ho (a třeba sní)
- ▶ během tohoto procesu člověk **zjistí** a **uloží** všechny základní vlastnosti předmětu
- ▶ později, když se **zmíní** daná věc, vyhledají se a připomenou uložené informace

## ▶ počítač

- ▶ musí se spolehnout na informace od lidí
- ▶ jednodušší informace – přímé *programování*
- ▶ složité informace – zadané v **symbolickém jazyce**

# Volba reprezentace znalostí

která **reprezentace znalostí** je **nejlepší**?

*Pro řešení skutečně obtížných problémů musíme používat několik různých reprezentací. Každý konkrétní typ datových struktur má totiž své klady a zápory a žádný se sám o sobě nezdá adekvátní pro všechny funkce zahrnuté v tom, čemu říkáme "selský rozum" (common sense).*

– Marvin Minsky

# Historie logického vyvozování

450 př.n.l.	stoikové	výroková logika, inference (pravděpodobně)
322 př.n.l.	Aristoteles	inferenční pravidla, kvantifikátory
1565	Cardano	teorie pravděpodobnosti (výroková logika + nejistota)
1847	Boole	výroková logika (znovu)
1879	Frege	predikátová logika 1. řádu
1922	Wittgenstein	důkaz pomocí pravdivostních tabulek
1930	Gödel	$\exists$ úplný algoritmus pro PL1
1930	Herbrand	úplný algoritmus pro PL1 (redukce na výroky)
1931	Gödel	$\neg\exists$ úplný algoritmus pro aritmetiku
1960	Davis/Putnam	“praktický” algoritmus pro výrokovou logiku
1965	Robinson	“praktický” algoritmus pro PL1 – rezoluce

## Předpoklad uzavřeného světa

2 užitečné předpoklady:

- ▶ **předpoklad uzavřeného světa** (*closed world assumption*)
  - cokoli o čem **nevíme**, že je **pravda**  $\rightarrow$  bereme za dané, že je to **nepravda**
  - využitý např. v Prologu (negace jako neúspěch)
- ▶ **předpoklad jednoznačných pojmenování** (*unique names assumption*)
  - různá jména označují různé objekty

# Logika – rezoluční pravidlo

vyvozování nových znalostí = hledání **důkazu**

algoritmus **konstrukce důkazu**:

- ▶ dopředné a zpětné řetězení – neúplné pro PL1 (úplné pro Hornovy klauzule)
- ▶ rezoluce – úplná pro důkaz sporem
- ▶ logické programování – SLD rezoluce

## Rezoluce v PL1

vyvozování v PL1 je pouze **částečně rozhodnutelné**:

- ▶ může najít důkaz  $\alpha$ , když  $KB \models \alpha$
- ▶ nemůže vždy dokázat, že  $KB \not\models \alpha$   
viz *problém zastavení* – důkazová procedura nemusí skončit  
nejde použít pro **generování**, pouze pro **vyvracení**

**rezoluce** je **důkaz sporem**:

pro důkaz  $KB \models \alpha$  ukážeme, že  $KB \wedge \neg\alpha$  je **nesplnitelné**

rezoluce používá  $KB$ ,  $\neg\alpha$  v **konjunktivní normální formě** (CNF), např.:

$$(P \vee Q) \Rightarrow (Q \Leftrightarrow R) \quad \equiv \quad \begin{array}{l} (\neg P \vee \neg Q \vee R) \\ \wedge (\neg P \vee Q \vee \neg R) \\ \wedge (\neg Q \vee R) \end{array}$$

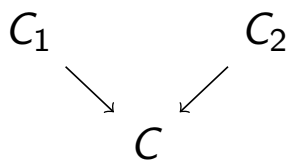
## Konjunktivní normální forma (CNF)

Algoritmus pro **převod** každé PL1 klauzule **do CNF**:

1. převedeme implikace na disjunkce:  $P \Rightarrow Q \rightarrow \neg P \vee Q$
2. přesuneme  $\neg$  dovnitř k literálům:  $\neg \forall x P \rightarrow \exists x \neg P$
3. přejmenujeme proměnné:  $\forall x P \vee \exists x Q \rightarrow \forall x P \vee \exists y Q$
4. přesuneme kvantifikátory doleva:  $\forall x P \vee \exists y Q \rightarrow \forall x \exists y P \vee Q$
5. eliminujeme  $\exists$  pomocí **Skolemizace**:  
 $\exists x P(x) \rightarrow P(c_1)$   
 $\forall x P(x) \Rightarrow \exists y Q(y) \rightarrow \forall x P(x) \Rightarrow Q(f(x))$
6. zahodíme univerzální kvantifikátory
7. roznásobíme  $\wedge$  pomocí  $\vee$ :  $(P \wedge Q) \vee R \rightarrow (P \vee R) \wedge (Q \vee R)$

## Rezoluční pravidlo

algoritmus je založen na opakované aplikaci **rezolučního pravidla** – ze dvou klauzulí odvodí novou klauzuli



- ▶ klauzule:  $C_1 = P_1 \vee P_2 \vee \dots \vee P_n$   
a  $C_2 = \neg P_1 \vee Q_1 \vee Q_2 \vee \dots \vee Q_m$
- ▶ výsledek:  
 $C = P_2 \vee P_3 \vee \dots \vee P_n \vee Q_1 \vee Q_2 \vee \dots \vee Q_m$
- ▶ vyruší se opačné literály  $P_1$  a  $\neg P_1$

postup **rezolučního důkazu tvrzení  $F$** :

- začneme s  $\neg F$
- rezolvujeme s klauzulí z KB (která obsahuje  $F$ )
- opakujeme až do odvození **prázdné klauzule**  $\square$
- když se to podaří  $\rightarrow$  došli jsme ke sporu (pro  $\neg F$ )  $\rightarrow$  **musí platit  $F$**

# Rezoluce – příklad

## ▶ pravidla

- $\text{mráz} \wedge \text{srážky} \Rightarrow \text{sněží}$   
 $\neg \text{mráz} \vee \neg \text{srážky} \vee \text{sněží}$
- $\text{Leden} \Rightarrow \text{mráz}$   
 $\neg \text{Leden} \vee \text{mráz}$
- $\text{mraky} \Rightarrow \text{srážky}$   
 $\neg \text{mraky} \vee \text{srážky}$

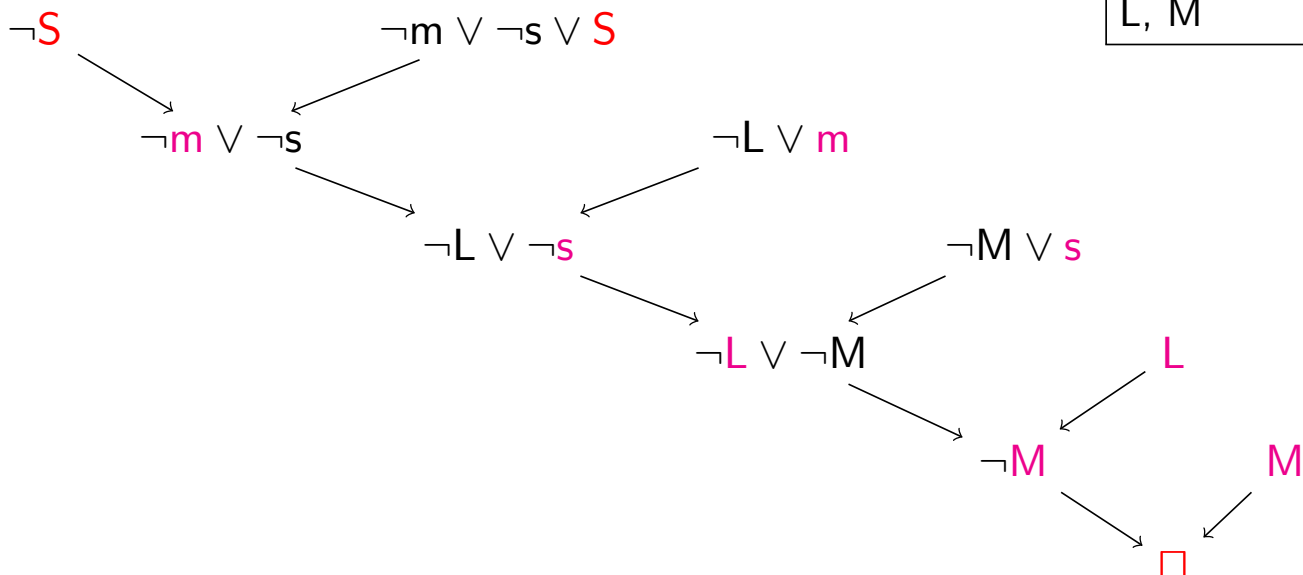
## ▶ fakta – Leden, mraky

## ▶ dotaz (co se má dokázat) – sněží?

## Důkaz tvrzení “sněží”

S – sněží, s – srážky, m – mráz, L – Leden, M – mraky

$\neg m \vee \neg s \vee S$
$\neg L \vee m$
$\neg M \vee s$
L, M



# Extralogické informace – třídy, sémantické sítě, rámce

## co jsme dosud ignorovali:

- ▶ objekty reálného světa mají mezi sebou **vztahy**
  - třídy/kategorie, podtřídy  $\times$  nadtřídy
  - hierarchie vztahů části/celku
  - dědění vlastností v hierarchiích
- ▶ stav světa se může **měnit** v čase
  - explicitní reprezentace času
  - nemonotónní uvažování (pravdivost se může měnit v čase)
- ▶ ne každá informace je “černobílá”
  - nejistota
  - statistika, fuzzy logika

## Třídy objektů

- ▶ “Chci si koupit fotbalový míč.”
  - *Chci si koupit FM27341* – špatně
  - *Chci si koupit objekt, který je prvkem třídy fotbalových míčů* – správně
- ▶ objekty jsou organizovány do **hierarchie tříd**
  - $FM27341 \in \text{fotbalové\_míče}$
  - $\text{fotbalové\_míče} \subset \text{míče}$
- ▶ **fakta** (objekty)  $\times$  **pravidla** (třídy)
  - *Všechny míče jsou kulaté.*
  - *Všechny fotbalové míče mají X cm v průměru.*
  - *FM27341 je červenomodrobílý.*
  - *FM27341 je fotbalový míč.*
  - (Proto: *FM27341 je kulatý a má X cm v průměru.*)

# Ontologie

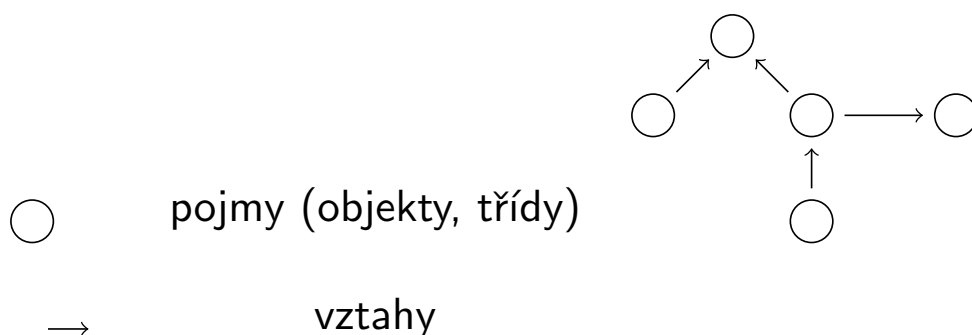
- ▶ **ontologie** ve filozofii – nauka o **existenci** a typech existencí
- ▶ **ontologie** v informatice – **formální popis znalostí**, pojmy a vztahy mezi pojmy, hierarchie
- ▶ ontologie **obecné** (*upper level*) × **doménové**
- ▶ různé dostupné obecné, žádná standardem (zatím):  
(Open)Cyc, SUMO/MILO, Dublin Core, DOLCE, ...  
<http://www.ontologyportal.org>

<pre>(=&gt;   (and     (instance ?KILL Killing)     (patient ?KILL ?OBJ))   (exists (?DEATH)     (and       (instance ?DEATH Death)       (experiencer ?DEATH ?OBJ)       (causes ?KILL ?DEATH))))</pre>	<p><i>Pokud nějaký proces (?KILL) je instancí <b>zabíjení</b> (Killing) a nějaký agent (?OBJ) je předmětem toho procesu</i></p> <p>=&gt;</p> <p><i>pak existuje jiný proces (?DEATH) takový, že tento jiný proces je instancí <b>smrti</b> (Death) a agent ?OBJ se účastní tohoto jiného procesu ?DEATH a původní proces ?KILL je příčinou tohoto jiného procesu ?DEATH</i></p>
--	---

## Sémantické sítě

**sémantické sítě** – reprezentace faktových znalostí (pojmy + vztahy)

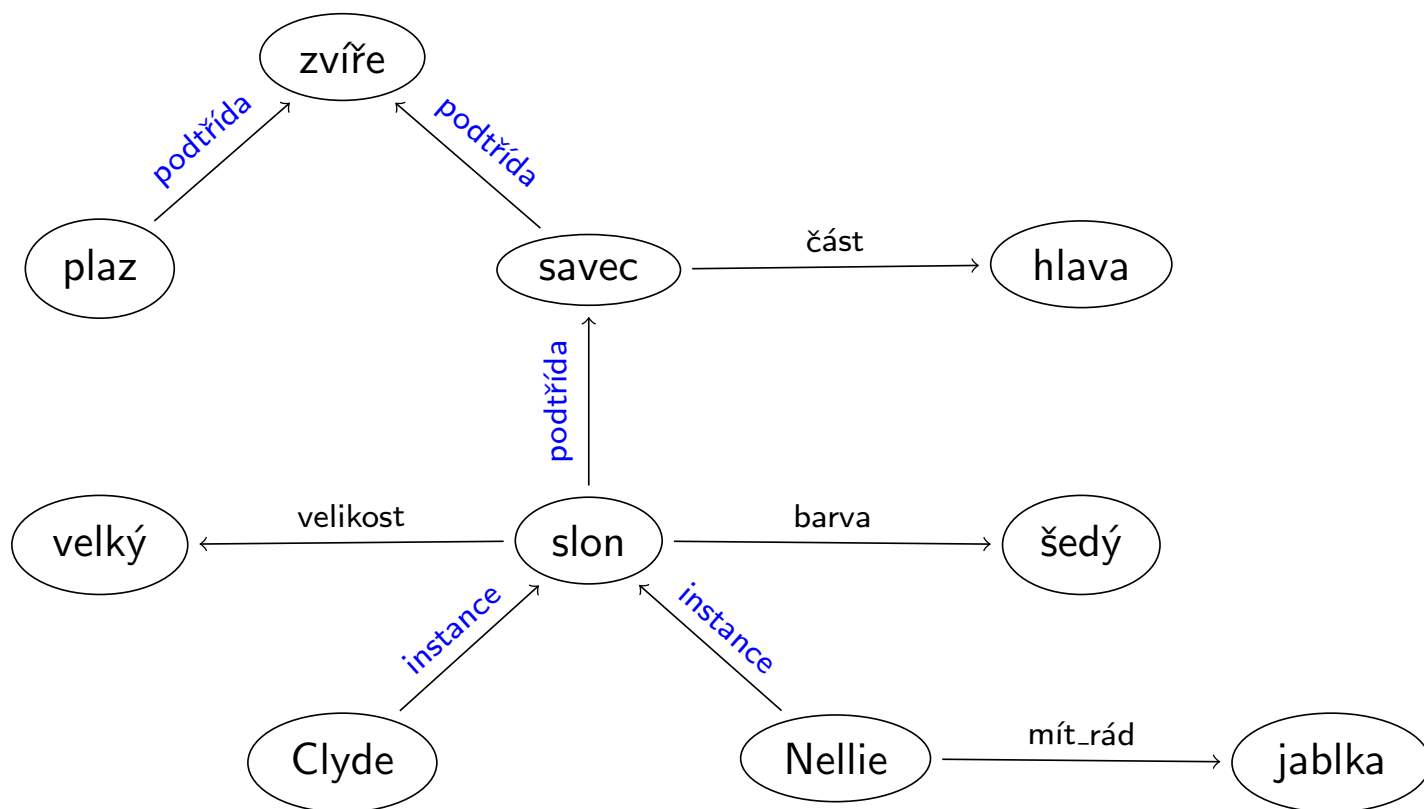
- ▶ vznikly kolem roku 1960 pro reprezentaci významu anglických slov
- ▶ znalosti jsou uloženy ve formě grafu



- ▶ nejdůležitější vztahy – **taxonomie**:
  - **podtřída** (*subclass*) – vztah mezi třídami
  - **instance** – vztah mezi konkrétním objektem a jeho rodičovskou třídou
- jiné vztahy – **část** (*has-part*), barva, ...



## Sémantické sítě – příklad



## Dědičnost v sémantických sítích

- ▶ pojem sémantické sítě *předchází* OOP
- ▶ **dědičnost**:
  - jestliže určitá vlastnost platí pro třídu → platí i pro všechny její podtřídy
  - jestliže určitá vlastnost platí pro třídu → platí i pro všechny prvky této třídy
- ▶ určení hodnoty vlastnosti – **rekurzivní algoritmus**
- ▶ potřeba specifikovat i výjimky – mechanismus **vzorů** a **výjimek** (*defaults and exceptions*)
  - **vzor** – hodnota vlastnosti u třídy nebo podtřídy, platí ta, co je blíž objektu
  - **výjimka** – u konkrétního objektu, odlišná od vzoru

## Dědičnost vztahů část/celek

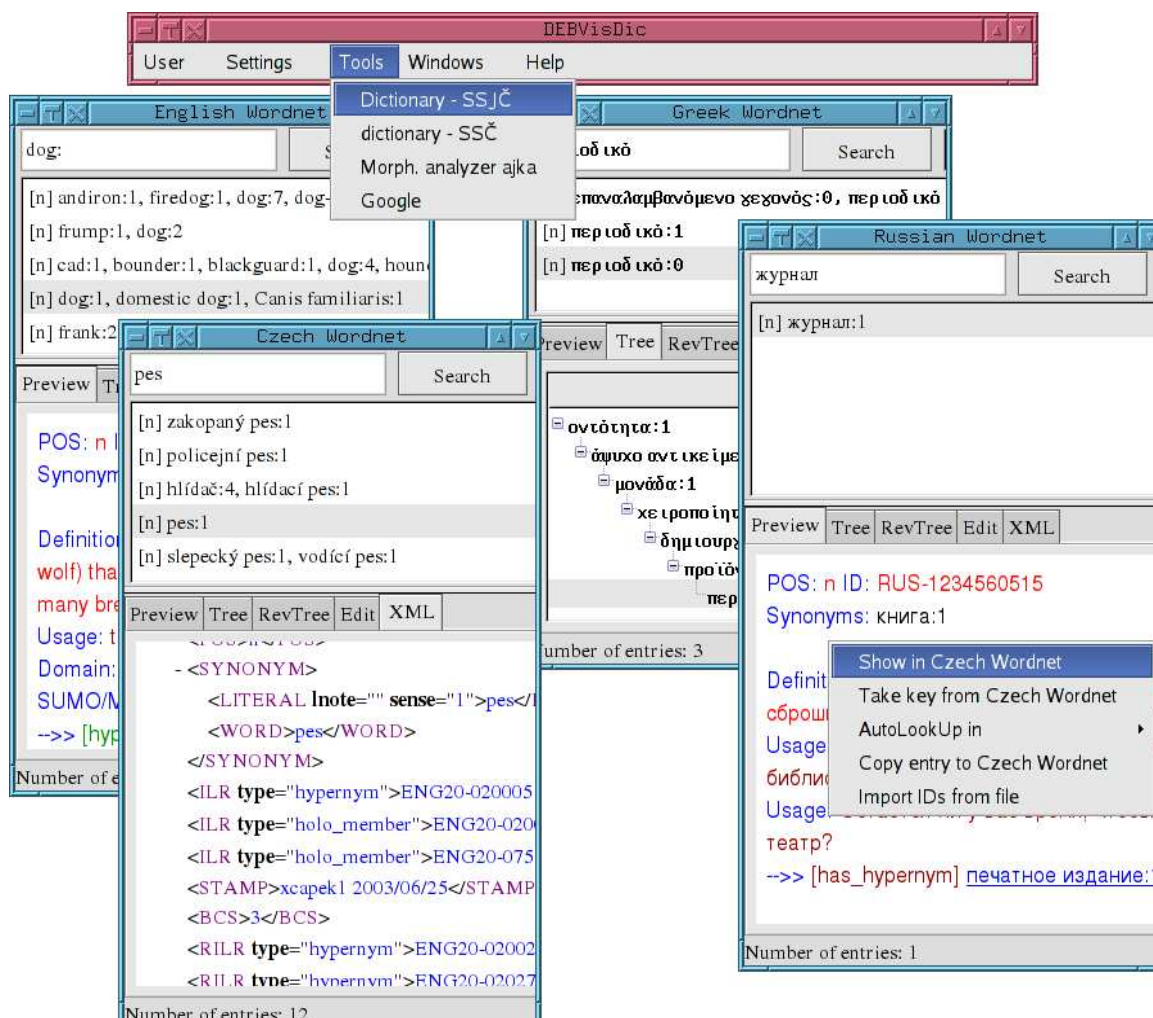
- ▶ “**Krávy mají 4 nohy.**”
  - každá noha je částí krávy
- ▶ “**Na poli je (konkrétní) kráva.**”
  - všechny části krávy jsou taky na poli
- ▶ “**Ta kráva (na poli) je hnědá (celá).**”
  - všechny části té krávy jsou hnědé
- ▶ “**Ta kráva je šťastná.**”
  - ~~všechny části té krávy jsou šťastné~~ – neplatí
- ▶ lekce: některé vlastnosti jsou děděny částmi, některé nejsou explicitně se to vyjadřuje pomocí pravidel jako

$$part-of(x, y) \wedge location(y, z) \Rightarrow location(x, z)$$

## Vzory a výjimky – příklad

- ▶ “Všichni ptáci mají křídla.”
- ▶ “Všichni **ptáci** umí létat.”
- ▶ “Ptáci se zlomenými křídly jsou ptáci, ale neumí létat.”
- ▶ “**Tučnáci** jsou ptáci, ale neumí létat.”
- ▶ “**Kouzelní tučňáci** jsou tučňáci, kteří umí létat.”
- ▶ kdo umí létat:
  - “Penelope je pták.”  $\Rightarrow$  “Penelope **umí** létat.”
  - “Penelope je tučňák.”  $\Rightarrow$  “Penelope **neumí** létat.”
  - “Penelope je kouzelný tučňák.”  $\Rightarrow$  “Penelope **umí** létat.”
- ▶ všimněte si, že víra v hodnotu vlastnosti objektu se může měnit s příchodem nových informací o klasifikaci objektu





Úvod do umělé inteligence 10/12 23 / 34

Extralogické informace Rámce

## Rámce

### Rámce (*frames*):

- ▶ varianta sémantických sítí
- ▶ velice populární pro reprezentaci znalostí v expertních systémech
- ▶ všechny informace relevantní pro daný pojem se ukládají do univerzálních struktur – **rámců**
- ▶ stejně jako sémantické sítě, rámce podporují dědičnost
- ▶ OO programovací jazyky vycházejí z teorie rámců

## Rámce – příklad

rámec obsahuje **objekty**, **sloty** a **hodnoty slotů**  
příklady rámců:

savec:

<i>podtřída:</i>	zvíře
<i>část:</i>	hlava
<i>*má_kožich:</i>	ano

slon:

<i>podtřída:</i>	savec
<i>*barva:</i>	šedá
<i>*velikost:</i>	velký

Nellie:

<i>instance:</i>	slon
<i>mít_rád:</i>	jablka

'\*' označuje **vzorové hodnoty**, které mohou měnit hodnoty u podtříd a instancí

## Sémantické sítě × rámce

sémantické sítě	rámce
uzly	objekty
spoje	sloty
uzel na druhém konci spoje	hodnota slotu

**deskripční logika** – logický systém, který manipuluje přímo s rámci

# Pravidlové systémy

- ▶ snaha zachytit **produkčními pravidly** znalosti, které má expert
- ▶ obecná forma pravidel

*IF*      *podmínka*  
*THEN*   *akce*

- podmínky – booleovské výrazy, dotazy na hodnoty **proměnných**
  - akce – nastavení hodnot proměnných, příznaků, . . .
- ▶ důležité vlastnosti:
    - znalosti mohou být strukturovány do modulů
    - systém může být snadno rozšířen přidáním nových pravidel beze změny zbytku systému

## Pravidlová báze znalostí – příklad

pravidla pro **oblékání**:

- pravidlo 1    IF X je seriózní  
                  AND X bydlí ve městě  
                  THEN X by měl nosit sako
- pravidlo 2    IF X je akademik  
                  AND X je společensky aktivní  
                  AND X je seriózní  
                  THEN X by měl nosit sako a  
                  kravatu
- pravidlo 3    IF X bydlí ve městě  
                  AND X je akademik  
                  THEN X by měl nosit kravatu
- pravidlo 4    IF X je podnikatel  
                  AND X je společensky aktivní  
                  AND X je seriózní  
                  THEN X by měl nosit sako, ale  
                  ne kravatu

**společenská** pravidla:

- pravidlo 5    IF X je podnikatel  
                  AND X je ženatý  
                  THEN X je společensky  
                  aktivní
- pravidlo 6    IF X je akademik  
                  AND X je ženatý  
                  THEN X je seriózní

**profesní** pravidla:

- pravidlo 7    IF X učí na univerzitě  
                  OR X učí na vysoké škole  
                  THEN X je akademik
- pravidlo 8    IF X vlastní firmu  
                  OR X je OSVČ  
                  THEN X je podnikatel

# Expertní systémy

- ▶ aplikace pravidlových systémů
- ▶ zaměřeny na specifické oblasti – medicínská diagnóza, návrh konfigurace počítače, expertíza pro těžbu ropy, ...
- ▶ snaha zachytit **znalosti experta** pomocí pravidel ale znalosti experta zahrnují – postupy, strategie, odhady, ...
- ▶ expertní systém musí pracovat s procedurami, nejistými znalostmi, různými formami vstupu
- ▶ vhodné oblasti pro nasazení expertního systému:
  - **diagnóza** – hledání řešení podle symptomů
  - **návrh konfigurace** – složení prvků splňujících podmínky
  - **plánování** – posloupnost akcí splňujících podmínky
  - **monitorování** – porovnání chování s očekávaným chováním, reakce na změny
  - **řízení** – ovládání složitého komplexu
  - **předpovědi** – projekce pravděpodobných závěrů z daných skutečností
  - **instruktáž** – inteligentní vyučování a zkoušení studentů

definujme akci  $A_t$  jako “**Vyrazit na letiště  $t$  hodin před odletem letadla.**”  
jak najít odpověď na otázku “**Dostanu se akcí  $A_t$  na letiště včas k odletu letadla?**”

problémy:

1. částečná pozorovatelnost (stav vozovky, záměry ostatních řidičů, ...)
2. nejistota výsledků akcí (píchnutí kola, ...)
3. obrovská složitost modelování a předpovědi dopravní situace

čistě **logický přístup** tedy:

- riskuje chybu – “ **$A_5$  mě tam dostane včas.**”
- vede k závěrům, které jsou příliš slabé pro rozhodování: “ **$A_5$  mě tam dostane včas, pokud nebude na dálnici nehoda a pokud nebude pršet a jestli nepíchnu kolo a jestli nebude fronta na odbavovacích přepážkách a jestli nebudou problémy při kontrole zavazadel ...**”



# Metody pro práci s nejistotou

## ▶ defaultní/nemonotónní logika

Předpokládejme, že nepíchnu cestou kolo.

Předpokládejme, že  $A_5$  bude OK, pokud se nenajde protipříklad.

## ▶ logická pravidla s faktory nejistoty (zastaralé)

$A_5 \mapsto_{0.3}$  dostat se na letiště včas.

zalévání  $\mapsto_{0.99}$  mokrý trávník

mokrý trávník  $\mapsto_{0.7}$  déšť

## ▶ pravděpodobnost (míra předpokladu, že hodnota bude *true*)

Vzhledem k dostupným informacím,  $A_3$  mě tam dostane včas s pravděpodobností 0.05.

poznámka: fuzzy logika se zabývá **mírou pravdivosti**, NE **pravděpodobností**

## Pravděpodobnost

Pravděpodobnost **sumarizuje** nejistotu pocházející z

- **lenosti** – nepodařilo se vypočítat všechny výjimky, podmínky, ...
- **neznalosti** – nedostatek relevantních údajů, počátečních podmínek, ...

**subjektivní** × **Bayesovská** pravděpodobnost:

- pravděpodobnostní vztah mezi tvrzením a jeho pravdivosti vzhledem k podmínkám:

$$P(A_4 | \text{žádné hlášené nehody}) = 0.5$$

nejedná se o vyjádření **pravděpodobnostní tendence** (ale může se získat ze znalostí podobných případů v minulosti)

- pravděpodobnost tvrzení se může měnit s novými (vstupními) podmínkami:

$$P(A_4 | \text{žádné hlášené nehody, je 4:00 ráno}) = 0.63$$

**Bayesovská síť** – acyklický orientovaný graf, uzly obsahují **tabulky podmíněných pravděpodobností** rodičů, umožňuje efektivní přesné nebo přibližné (Monte Carlo) **vyvozování**. Nejčastěji používaný aparát pro vyvozování z nejistých znalostí.



## Vyvozování z nejistých znalostí

- ▶ použití **náhodných proměnných** (*random variables*) – **funkce**, která vzorkům přiřazuje hodnoty → vrací výsledky měření sledovaného jevu **distribuce pravděpodobností** náhodné proměnné = (vektor) pravděpodobnost(i), že daná náhodná proměnná bude mít určitou konkrétní hodnotu

např.: náhodná proměnná **Odd** vyjadřující, že výsledek hodu kostkou bude lichý  
náhodná proměnná **Weather** vyjadřující, jaké bude počasí (slunce, déšť, mraky, sníh)

$$\text{Odd}(1) = \text{true} \quad \text{Weather}(21.11.2005) = \text{déšť}$$

distribuce pravděpodobností proměnných *Odd* a *Weather*

$$P(\text{Odd} = \text{true}) = 1/6 + 1/6 + 1/6 = 1/2$$

$$P(\text{Odd}) = \langle 1/2, 1/2 \rangle$$

$$P(\text{Weather}) = \langle 0.72, 0.1, 0.08, 0.1 \rangle$$

- ▶ pravidla pro výpočet pravděpodobnosti logicky souvisejících událostí

$$P(a \vee b) = P(a) + P(b) - P(a \wedge b)$$

## Bayesovské pravidlo pro vyvozování

pravidlo pro **podmíněnou pravděpodobnost** –  $P(a|b) = \frac{P(a \wedge b)}{P(b)}$  if  $P(b) \neq 0$   
z toho lze odvodit **Bayesovské pravidlo** pro určení **diagnostické** pravděpodobnosti ze znalosti **příčinné** pravděpodobnosti:

$$P(\text{Příčina}|\text{Následek}) = \frac{P(\text{Následek}|\text{Příčina})P(\text{Příčina})}{P(\text{Následek})}$$

např. *ZMB* zánět mozkových blan, *ZK* ztuhlý krk:

$$P(\text{zmb}|\text{zk}) = \frac{P(\text{zk}|\text{zmb})P(\text{zmb})}{P(\text{zk})} = \frac{0.8 \times 0.0001}{0.1} = 0.0008$$

**vyvozování** =

1. rozdělení akce na **atomické události**
2. zjištění **pravděpodobností** atomických událostí
3. výpočet/odvození pravděpodobností pomocí **složených distribucí pravděpodobností** (*joint probability distribution*)