Predikátová logika, situační kalkulus, produkční systémy

Jiří Kléma

Katedra kybernetiky,
FEL, ČVUT v Praze

http://ida.felk.cvut.cz/moodle/

Logika jako nástroj pro reprezentaci znalostí

- Jaké vhodné vlastnosti demonstrovala výroková logika?
  - deklarativnost
    - znalosti a usuzování jsou přirozeně odděleny,
    - procedurální jazyky – postrádají obecný mechanismus pro usuzování.
  - možnost vyjádřit neúplnou informaci
    - pomocí disjunkce (a negace),
    - "Zítra odpoledne půjdu do kina nebo budu sportovat."
    - není samozřejmostí (databáze, datové struktury).
  - je kompozičním a kontextově nezávislým jazykem
    - význam věty je funkcí významu jejich částí,
    - význam $A \wedge B$ má vztah k pravdivosti A a B,
    - na rozdíl od přirozeného jazyka: "Pak to viděla."

Predikátová logika (PL)

- Výroková logika má omezenou expresivitu
  - problémy se škálováním ve wumpusově světě, nemá silné mechanismy pro zobecnění,
  - např. rozměry bludiště
    - Všechna pole sousedící s wumpusem zapáchají.
    - $W_{1,2} \Rightarrow (S_{1,1} \wedge S_{2,2} \wedge S_{1,3})$, $W_{2,1} \Rightarrow (S_{1,1} \wedge S_{2,2} \wedge S_{3,1})$ atd.
  - dále vztahy mezi objekty, čas,
  - dříve zmíněný Aristotelův sylogismus o Sokratovi.
- PL zavádí objekty a relace mezi nimi
  - inspiruje se v síle přirozeného jazyka, zachovává ale jednoznačnost.
- **PL 1.řádu (first-order logic, FOL)**
  - záměrné omezení expresivity:
    - relace samotné nelze považovat za objekty,
    - nelze zapisovat tvrzení o všech relacích, tj. např. obecně definovat tranzitivitu.
- logiky vyšších řádů
  - větší expresivita, obtížnější teorie i efektivní použití.

Predikátová logika 1.řádu – syntaxe

- Syntaxe – elementy jazyka
  - **konstanty** odkazují na konkrétní objekty
    - petr, pavel, skotsko, základy-umělé-inteligence (Prolog: začínají malým písmenem).
  - **predikáty** vyjadřují vztahy mezi objekty či jejich vlastnosti,
    - muž(petr), otec(petr,pavel), žije(petr,skotsko) (arita = počet prvků relace).
  - **funkce** jako nepřímé odkazy na objekt,
    - otec(petr), žije(petr) (jak je vidět, funkce lze nahradit predikáty).
  - **proměnné** odkazují na množiny objektů,
    - X, Y, Z (Prolog: začínají velkým písmenem).
  - **kvantifikátory** určující interpretaci proměnných
    - $\forall$ (pro všechny) – při jakékoli substituci objektu za proměnnou věta platí,
    - $\exists$ (existuje) – lze nalézt objekt, který při substituci za proměnnou zajistí platnost věty,
    - $\forall$ X $\exists$ Y učí(X,Y) – každý předmět má alespoň jednoho učitele.
  - **logické spojky** a závorky
    - stejné jako ve výrokové logice.

V souvislosti se značením konstant, funkcí a predikátů mluvíme o symbolech.

Predikátová logika 1.řádu – syntaxe

- Syntaxe – definice korektních výrokových formulí
  - **term** je každá konstanta, proměnná nebo funkce na ně aplikovaná
    - odkazuje na objekt, nic jiného termem není (tj. predikáty nejsou termy).
  - **dobře utvořenou formulí** (well-formed formula (WFF)) jsou
    - **atomické formule** $p(t_1, \ldots, t_n)$, kde p je predikátový symbol a t_i termy,
    - formule $\neg p$ a $p \Rightarrow q$, pokud p a q jsou WFF,
    - formule $\forall X p$, pokud X je proměnná a p WFF.
- Syntaxe poznámky
  - WFF může obsahovat volné proměnné (nevázané kvantifikátorem),
    - to působí problémy při interpretaci WFF, **věta** je WFF pouze s vázanými proměnnými.
  - z hlediska definice jsou spojky $\vee, \wedge, \Leftrightarrow$ a kvantifikátor $\exists$ odvozené.

Predikátová logika 1.řádu – sémantika, interpretace

- Jak určovat platnost vět v PL 1.řádu? Je dána kontextem, ale ...
- Ověřování pravdivosti pro všechny modely?
  - pracujeme s velkými nebo neomezenými doménami (např. reálná čísla),
  - v důsledku může existovat i neomezený počet modelů.
- **Interpretace** definuje:
  - které objekty, predikáty a fce odpovídají příslušným symbolům a jejich význam
    - **doména** $\Delta = \{$Jiří Kléma, Filip Železný, STM Y33ZUI, BK X33KUI$\}$,
    - interpretace konstant: $l_C : C \rightarrow \Delta$,
      jirka odkazuje na Jiřího Klému, zui na předmět STM Y33ZUI, atd.
    - interpretace predikátů s aritou n: $l_P : P \rightarrow P(\Delta^n)$,
      učí odkazuje na vztah mezi učitelem a předmětem, učí/2 = {{jirka,zui},{filip,kui}}.
- Je formule $\forall X(p(X) \vee q(X)) \Rightarrow (\forall X p(X) \vee \forall X q(X))$ tautologií?
  - pro vyvrácení stačí nalézt interpretaci v níž formule neplatí,
  - např. v interpretaci Δ={a,b}, $p_D = \{a\}$, $q_D = \{b\}$,
  - levá strana implikace platí: X=a: $p(a) \vee q(a) = T \vee F = T$, X=b: $p(b) \vee q(b) = F \vee T = T$,
  - pravá strana ne: X=b: $p(b) = F$, $\forall X p(X) = F$ podobně pro X=a a $\forall X q(X) = F$.

Inference v PL 1.řádu – unifikace

- Jak korektně **substituovat** za volné proměnné resp. termy při srovnávání výrazů?
  - dotaz: Koho zná Jirka?
  - ?zna(jirka,X) – vrať všechny korektní substituce za volnou proměnnou vzhledem ke KB,
  - KB: Jirka zná Filipa. Václava zná každý. Každý zná svoji matku. Monika někoho zná.
  - $zna(jirka, filip)$, $\forall Y\, zna(Y, vaclav)$, $\forall Z\, zna(Z, matka(Z))$, $\exists W\, zna(monika, W)$,
  - $zna(jirka, filip)$, $zna(Y, vaclav)$, $zna(Z, matka(Z))$, $zna(monika, s1)$,
  - substituce: $\theta_1 = \{X|filip\}$, $\theta_2 = \{jirka|Y, X|vaclav\}$, $\theta_3 = \{jirka|Z, X|matka(jirka)\}$,
  - hledáme co **nejobecnější** substituci, aby výrazy byly unifikovatelné.
- Substituce a unifikace nutná pro jakoukoli inferenci, viz. generalizovaný modus ponens

$$\frac{A, A \Rightarrow B}{B} \rightarrow \frac{p'_1, \ldots, p'_n, (p_1 \wedge p_2 \wedge \cdots \wedge p_n \Rightarrow q)}{Subst(\theta, q)}$$

$$Subst(\theta, p'_i) = Subst(\theta, p_i)$$

  - Když se dva lidé znají, tak se zdraví. $\rightarrow \forall XY(zna(X, Y) \Rightarrow zdravi_se(X, Y))$
  - aplikace MP na KB $\vdash zdravi_se(jirka, filip)$, $zdravi_se(Y, vaclav)$, $zdravi_se(U, matka(U))$, $zdravi_se(monika, s1)$.

Inference v PL 1.řádu – rezoluční pravidlo

- U rezoluce unifikace zejména při identifikaci doplňkových literálů
  - Vládu zná každý z katedry. $\rightarrow \forall X(z_katedry(X) \Rightarrow zna(X, vlada))$,
  - klauzule: $\neg z_katedry(X) \vee zna(X, vlada)$
  - klauzule viz. minulý slajd: $\neg zna(U, V) \vee zdravi_se(U, V)$,
  - substituce: $\theta = \{V|vlada, X|U\}$,
  - rezolventa: $\neg z_katedry(U) \vee zdravi_se(U, vlada)$.

Rezoluce v PL 1.řádu – převod do CNF (1)

- Obtížnější převod do CNF než u výrokové logiky – proměnné a kvantifikátory
- Př: Všichni Římané, kteří znají Markuse, buď nenávidí Caesara nebo si myslí, že každý kdo někoho nenávidí je blázen.

$$\forall X \big[(riman(X) \wedge zna(X, markus)) \Rightarrow \\ (nenavidi(X, caesar) \vee \forall Y \exists Z (nenavidi(Y, Z) \Rightarrow ma_za_blazna(X, Y)))\big]$$

- Obecné kroky převodu:

1. odstranění implikací

$$\forall X \big[\neg(riman(X) \wedge zna(X, markus)) \vee \\ (nenavidi(X, caesar) \vee \forall Y \neg(\exists Z nenavidi(Y, Z)) \vee ma_za_blazna(X, Y)))\big]$$

2. přesun negací k atomickým formulím

$$\forall X \big[\neg riman(X) \vee \neg zna(X, markus) \vee \\ nenavidi(X, caesar) \vee \forall Y \forall Z (\neg nenavidi(Y, Z) \vee ma_za_blazna(X, Y))\big]$$

3. skolemizace – eliminace existenčních kvantifikátorů,
   - zde žádný výskyt, ale: $\forall X \exists Y otec(Y, X) \rightarrow \forall X otec(s1(X), X)$
   - s1 je v daném případě Skolemovou funkcí (každému X přiřazuje otce)

Rezoluce v PL 1.řádu – převod do CNF (2)

- Obecné kroky převodu (pokr.):

  5. oddělení jmen proměnných
     - pro formule typu: $\forall X riman(X) \vee \forall X rek(X) \rightarrow \forall X riman(X) \vee \forall Y rek(Y)$
  6. přesun univerzálních kvantifikátorů zcela vlevo – **prenexní** tvar,

$$\forall XYZ\big[\neg riman(X) \vee \neg zna(X, markus) \vee \\ nenavidi(X, caesar) \vee \neg nenavidi(Y, Z) \vee ma_za_blazna(X, Y)\big]$$

  7. přesun disjunkcí k literálům
     - aplikace distributivních zákonů $a \vee (b \wedge c) \rightarrow (a \vee b) \wedge (a \vee c)$
  8. eliminace univerzálních kvantifikátorů – bezkvantifikátorové jádro.

$$\neg riman(X) \vee \neg zna(X, markus) \vee \\ nenavidi(X, caesar) \vee \neg nenavidi(Y, Z) \vee ma_za_blazna(X, Y)$$

Klade Zuzana vajíčka? – motivační příklad 3

:: Pokud vám řeknu, že:

- (S1) Ptakopysk a ježura jsou jediní savci kladoucí vejce.
- (S2) Pouze ptáci a savci jsou teplokrevní.
- (S3) Zuzana, můj pásovec, je teplokrevná a nemá peří.
- (S4) Každý pták má peří.

:: a zeptám se: (D) Klade Zuzana vejce?

Klade Zuzana vajíčka? – motivační příklad 3

:: Pokud vám řeknu, že:

- (S1) Ptakopysk a ježura jsou jediní savci kladoucí vejce.
- (S2) Pouze ptáci a savci jsou teplokrevní.
- (S3) Zuzana, můj pásovec, je teplokrevná a nemá peří.
- (S4) Každý pták má peří.

:: a zeptám se: (D) Klade Zuzana vejce?

:: Inference v přirozeném jazyce:

- Zuzana nemá peří a proto není pták.
- Zuzana je teplokrevná a není pták, proto musí být savec.
- Zuzana je savec a pásovec, protože není ježura ani ptakopysk nemůže klást vejce.

:: Jak realizovat strojově? Reprezentace pomocí řetězců je problematická z hlediska odvozování nových tvrzení ...

Klade Zuzana vajíčka – důkaz rezolucí (1)

:: Přepis do predikátové logiky 1.řádu:

- (S1) $\forall X(savec(X) \wedge vejce(X) \Rightarrow jezura(X) \vee ptakopysk(X))$
- (S2) $\forall X(teplokrevny(X) \Rightarrow ptak(X) \vee savec(X))$
- (S3) $pasovec(zuzana) \wedge teplokrevny(zuzana) \wedge \neg peri(zuzana)$
- (S4) $\forall X(ptak(X) \Rightarrow peri(X))$
- (F) $\forall X(pasovec(X) \Rightarrow \neg(ptakopysk(X) \vee jezura(X)))$
- (D) $vejce(zuzana)$

Klade Zuzana vajíčka – důkaz rezolucí (1)

:: Přepis do predikátové logiky 1.řádu:

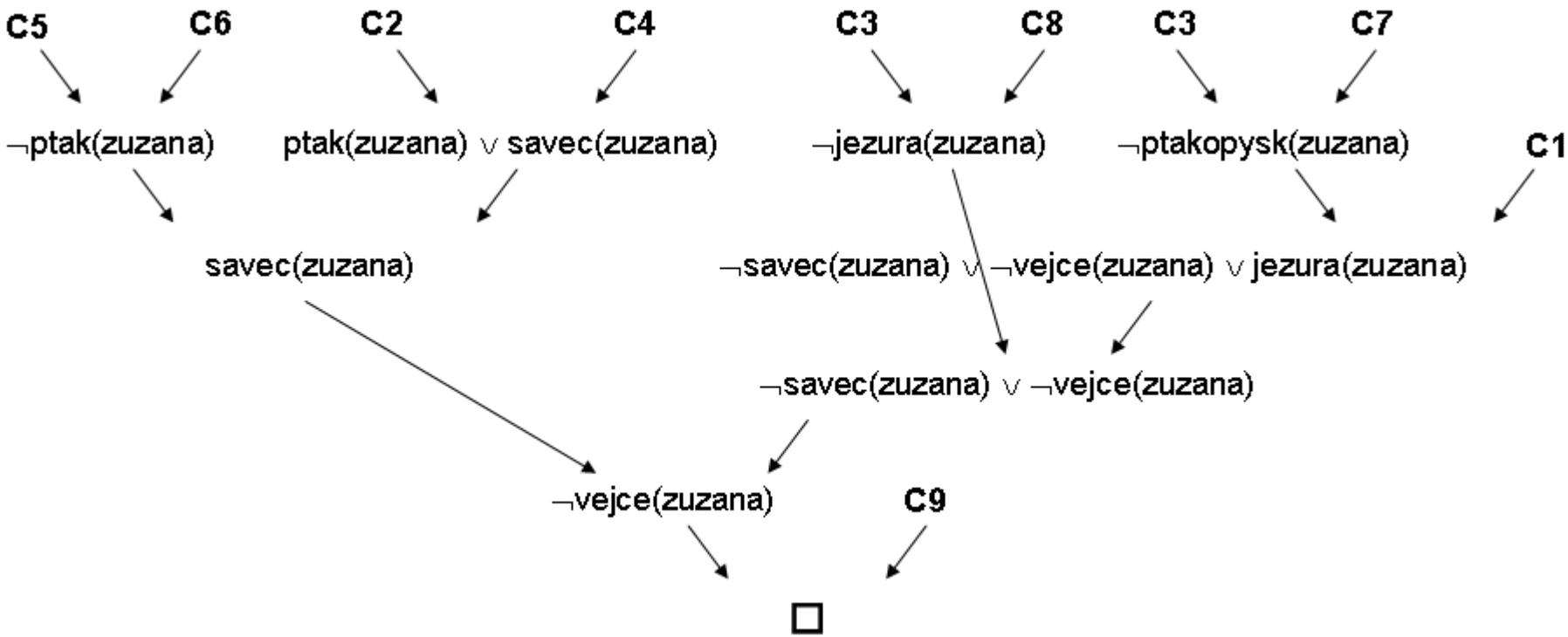
- (S1) $\forall X(savec(X) \wedge vejce(X) \Rightarrow jezura(X) \vee ptakopysk(X))$
- (S2) $\forall X(teplokrevny(X) \Rightarrow ptak(X) \vee savec(X))$
- (S3) $pasovec(zuzana) \wedge teplokrevny(zuzana) \wedge \neg peri(zuzana)$
- (S4) $\forall X(ptak(X) \Rightarrow peri(X))$
- (F) $\forall X(pasovec(X) \Rightarrow \neg(ptakopysk(X) \vee jezura(X)))$
- (D) $vejce(zuzana)$

:: Transformace do klauzální formy:

- (C1) $\neg savec(X) \vee \neg vejce(X) \vee jezura(X) \vee ptakopysk(X)$
- (C2) $\neg teplokrevny(X) \vee ptak(X) \vee savec(X)$
- (C3,4,5) $pasovec(zuzana) \wedge teplokrevny(zuzana) \wedge \neg peri(zuzana)$
- (C6) $\neg ptak(X) \vee peri(X)$
- (C7,8) $(\neg pasovec(X) \vee \neg ptakopysk(X)) \wedge (\neg pasovec(X) \vee \neg jezura(X))$
- (C9) $vejce(zuzana)$

Klade Zuzana vajíčka – důkaz rezolucí (2)

:: Strom rezolučního zamítnutí:



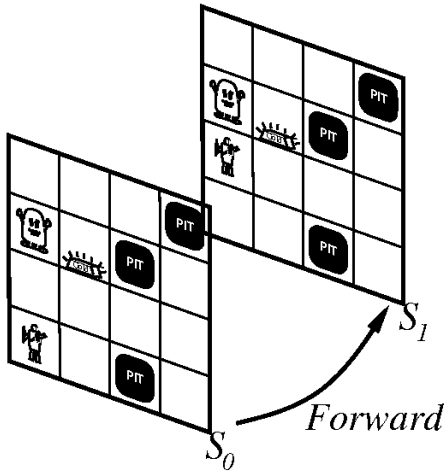
:: Tvrzení, že Zuzana klade vejce je ve sporu s teorií. **Zuzana vejce neklade.**

PL ve wumpusově světě

- PL je dostatečně expresivní pro popis wumpusova světa a inferenci v něm
- reprezentace prostředí
  - sousednost jeskyní
    $\forall XYAB\,[sousedi([X,Y],[A,B]) \Leftrightarrow [A,B] \in \{[X+1,Y],[X-1,Y],[X,Y+1],[X,Y-1]\}]$
  - diagnostická pravidla – od pozorovatelných jevů k jejich příčinám – pro výskyt vánku
    $\forall S\,(vanek(S) \Rightarrow \exists R\,(sousedi(R,S) \wedge sachta(R)))$,
    $\forall S\,(\neg vanek(S) \Rightarrow \neg\exists R\,(sousedi(R,S) \wedge sachta(R)))$,
  - kauzální pravidla – vlastnosti prostředí generují vnější projevy – pro jeskyně
    $\forall R\,(sachta(R) \Rightarrow \forall S\,(sousedi(R,S) \Rightarrow vanek(S)))$,
    $\forall S\,[\forall R\; sousedi(R,S) \Rightarrow \neg sachta(R)] \Rightarrow \neg vanek(S)$,
  - výše uvedená diagnostická a kauzální pravidla jsou ekvivalentní zápisu:
    $\forall S\,(vanek(S) \Leftrightarrow \exists R\,(sousedi(R,S) \wedge sachta(R)))\,.$
- obtížnější je zachycení vnímání, reflexe, modifikace prostředí
  - vnímání (T vyjadřuje čas, resp. číslo kroku)
    $\forall TSB\,(senzory([S,B,trpyt],T) \Rightarrow trpyt(T))$
  - reflexe
    $\forall T\,(trpyt(T)) \Rightarrow nejlepsi_akce(uchop,T))$

Sledování změn

- fakta platí v konkrétních **situacích**, spíše než věčně,
- **situační kalkul** je jedním ze způsobů reprezentace změn ve FOL,
  - predikáty dělí na neměnné (rigid, eternal) a flexibilní (fluents),
  - přidává situační argument ke každému predikátu s možnou změnou platnosti,
  - flexibilní např. $drzi(zlato, nyni)$, term $nyni$ označuje situaci,
  - neměnný např. $sachta(R)$, $sousedi(R, S)$
  - situace jsou vázány $result$ funkcí,
  - výsledkem $result(a, s)$ je situace, do níž dospějeme provedením akce a v situaci s.



Popis a použití akcí

- "důsledkový" axiom – popisuje změny, které jsou výsledkem akce
  - $\forall s\ seZlatem(s) \rightarrow drzi(zlato, result(uchop, s))$
- axiom "rámce" – popisuje, co akce **nezměnila**
  - $\forall s\ maSip(s) \rightarrow maSip(result(uchop, s))$
- **problém rámce**: jak elegantně zvládnout fakta beze změny
  - (a) reprezentační – vyhni se axiomům rámce,
    pro F flexibilních predikátů a A akcí potřebujeme $\mathcal{O}(FA)$ axiomů rámce.
  - (b) inferenční – vyhni se opakovanému přepisování k udržení informace o stavu,
- **kvalifikační problém**
  - věrný popis reálných akcí vyžaduje nekonečnou péči,
  - co když zlato bude kluzké nebo přibité k zemi nebo . . . ?
- **problém důsledku**
  - skutečné akce mají mnoho skrytých důsledků,
  - s agentem se přesouvá vše co drží, se zlatem se přesouvá i prach, rukavice se opotřebovávají,

Popis a použití akcí

- axiomy "následných stavů" řeší reprezentační problém rámce,
- každý axiom se dotýká predikátu (a nikoli akce samotné)

  P platí po provedení akce $\Leftrightarrow$ [akce vedla ke splnění P
  $\vee$ P již platilo a akce P nezneplatnila]

- pro manipulaci se zlatem

$$\forall a, s\ drzi(zlato, Result(a, s)) \Leftrightarrow$$
$$[(a = uchop \wedge seZlatem(s)) \vee (drzi(zlato, s) \wedge a \neq uvolni)]$$

- dostaneme F axiomů s celkovým počtem literálů $\mathcal{O}(AE)$ (E je počet efektů na akci).

Vytváření plánů

- počáteční podmínky v bázi znalostí
  - $poloha(agent, [1,1], s_0)$, $poloha(zlato, [1,2], s_0)$,
- dotaz:
  - $Zjisti(KB, \exists s\ drzi(zlato, s))$,
  - tj., v jaké situaci budu držet zlato?
- odpověď:
  - $\{s/result(uchop, result(jdi_vpred, s_0))\}$,
  - tj., jdi vpřed a poté uchop zlato,
- předpoklady:
  - agent se zajímá pouze o plány započínající v s_0,
  - s_0 je jedinou situací popsanou v KB.

Vytváření plánů: lepší způsob

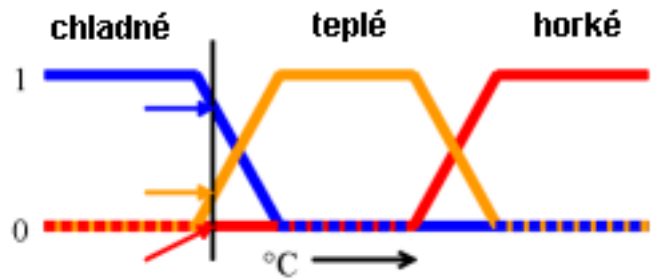
- vyjádři plány jako posloupnosti akcí $[a_1, a_2, \ldots, a_n]$,
- $planResult(p, s)$ je výsledkem provedení plánu p ve stavu s
  - projekční úloha – jaká je výsledná situace po aplikování dané posloupnosti akcí?
    $pozice(agent, [1,1], s_0) \wedge pozice(zlato, [1,1], s_0) \wedge \neg drzi(O, s_0)$
    $pozice(zlato, [1,1], result([jdi([1,1],[1,2]), uchop(zlato), jdi([1,2],[1,1])], s_0))$
  - plánovací úloha – jaká posloupnost akcí vede k dané situaci?
- dotaz $Zjisti(KB, \exists p\ drzi(zlato, planResult(p, s_0)))$
  - má řešení $\{p/[jdi_vpred, uchop]\}$,
- definice $planResult$ v rámci $result$
  - $\forall s\ planResult([\,], s) = s$,
  - $\forall a, p, s\ planResult([a|p], s) = planResult(p, result(a, s))$,
- viz **plánování** probírané dříve
  - specializované plánovací systémy uspěšnější než obecné usuzování.

Kdy predikátová logika není vhodná?(1)

- Pro **nemonotónní** odvozování $\longrightarrow$ nemonotónní logiky,
  - monotónnost PL – přidáním nového tvrzení nelze zrušit platnost tvrzení dříve odvozeného,
  - protipříkladem je vhodnost připuštění obecných tvrzení a jejich výjimek:
    - Každý pták létá. Tučňáci jsou ptáci. Quido je tučňák. $\vdash$ Quido létá.
    - výjimka: Tučňáci nelétají. $\vdash$ Quido nelétá.
    - v PL jde o nekonzistentní bázi znalostí a lze z ní rezolucí odvodit cokoli.
- Pro práci s **časem** $\longrightarrow$ temporální modální logika,
  - lze i přímo v PL
    - zabit(caesar,brutus,-44), $\forall$ X Y T (zabit(X,Y,T) $\wedge$ T<nyní $\Rightarrow$ mrtev(X)) $\vdash$ mrtev(caesar)
  - temporální modální logika zavádí modální operátory P, F, H, G:
    - P $\sim$ někdy platilo, že ..., F $\sim$ někdy bude platit, že ..., H $\sim$ vždy platilo, že ..., G $\sim$ vždy bude platit, že ...,
    - potom nutně platí axiomy Pp $\Leftrightarrow$ $\neg$H$\neg$p, Gp $\Rightarrow$ Fp atd.
    - příklad tvrzení: F$\exists$X(filozof(X) $\wedge$ F král(X)) $\sim$ Objeví se (v budoucnu) někdo, kdo bude filozof a později se stane králem.

Kdy predikátová logika není vhodná?(2)

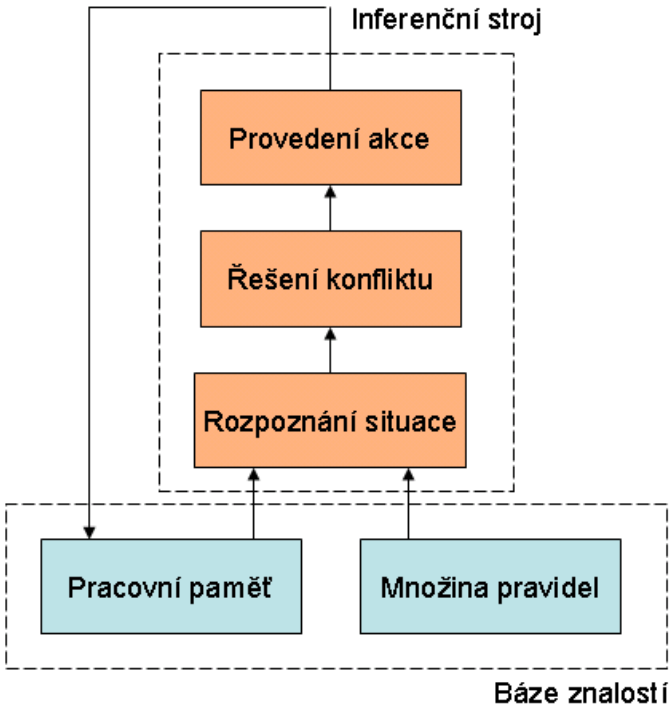
- Vyjádření **nejistoty** → fuzzy logika, Dempster-Shaferova teorie, pravděpodobnost
  - příčiny: omezená pozorovatelnost světa, nedeterministické vztahy mezi objekty nebo výsledky akcí, zjednodušení kvůli efektivitě,
  - příklad fuzzy pravidla:
    pokud je **chladné počasí** a **cena ropy** je **nízká**, pak je **topení** zapnuto **naplno**,
  - **lingvistické proměnné** nabývají množiny hodnot, každá hodnota je **fuzzy množinou**.



- Vyjádření **přesvědčení, víry** → podpřípad nejistoty, modální logika
  - příklad 1: Alenka ví, že je Bertík přesvědčen, že Cyril lže. Alenka věří, že Bertík je neomylný.
    Tedy: Alenka věří, že Cyril lže.
  - příklad 2: A ví, že Václav Klaus je Václav Klaus. Václav Klaus je prezidentem ČR.
    Platí, že: A ví, že Václav Klaus je prezidentem ČR ???

Produkční systém

- Soubor produkčních pravidel
  - pravidlo: situace ⇒ akce, obecná znalost,
  - situační část pravidla popisuje podmínku, za níž může být pravidlo použito
  - situace = konjunkce podmínek,
  - akce (přidej, odeber, změň) nebo jejich sekvence,
- Báze dat (pracovní paměť)
  - popisuje okamžitý stav problému,
  - obsahuje počáteční i odvozená data,
- Inferenční stroj (interpret pravidel)
  - porovnává bázi dat se situacemi v pravidlech,
  - vybírá vhodná pravidla (řeší konflikty),
  - provádí jimi definované akce - upravuje paměť,
  - přímé (nebo zpětné) řetězení - končí nesplněním žádné ze situací.



Činnost produkčního systému

- Probíhá obvykle v cyklu
  - rozpoznání situace ⇒ vykonání akce
  - součástí jsou: instanciace proměnných pravidla, výběr jediného pravidla, změna obsahu pracovní paměti,
- Strategie řešení konfliktu
  - preference pravidel s větším počtem podmínek na levé straně,
  - zákaz opakování pravidla z předchozího kroku (ochrana proti zacyklení),
  - upřednostnění novějších dat, užitých k aktivaci pravidla,
- Efektivita v reálných úlohách?
  - nejvíce času se obvykle spotřebuje na nalezení podmnožiny instancí použitelných pravidel,
  - to lze urychlit jejím zachováním i pro příští kroky (mění se malá část pracovní paměi),
  - dále i kompilace pravidel do efektivnější reprezentace, nebo jejich struktury (stromy),
  - reference mezi pravidly a daty - testujeme pouze nadějná pravidla.

Produkční systém pro wumpusův svět

```
% working memory
gold((2,4))   and
wumpus((1,3)) and
pit((3,1))    and
pit((3,3))    and
pit((4,4))    and

knows_no_wumpus((1,1)) and
knows_no_pit((1,1)) and
knows_ok((1,1))     and

agent((1,1))
```

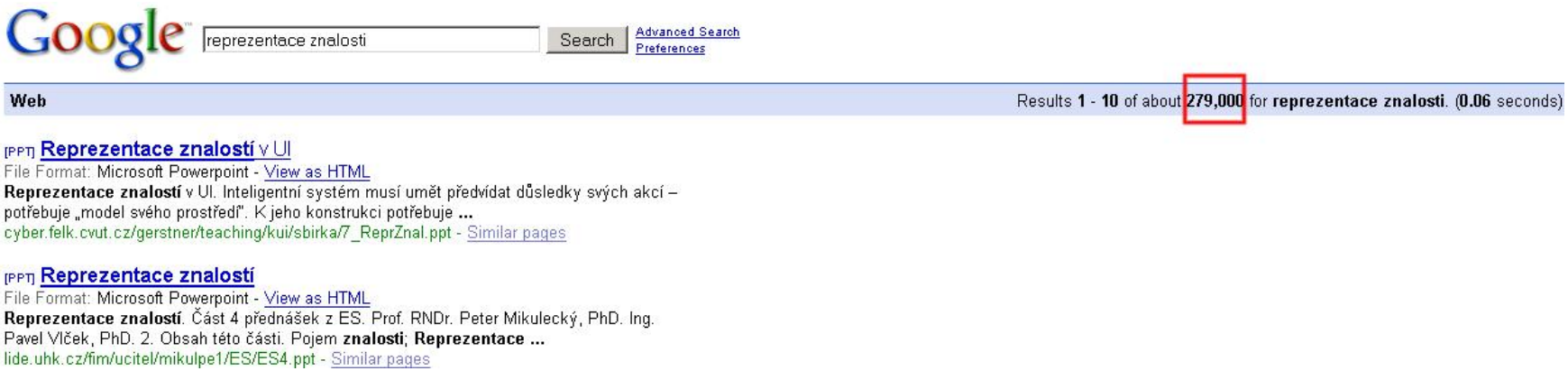
```
% environment - example
rule generate_stench(S)
if
     agent(S) and
     wumpus(W)  and
     call(adjacent(W,S))
then
     knows_stench(S).

% agent reasoning - example
rule no_pit(N)
if
    agent(A)  and
    not knows_breeze(A)  and
    call(adjacent(A,N))
then
    knows_no_pit(N)
```

Produkční systémy - souvislosti

- Formalismus prohledávání stavového prostoru,
  - stav je uložen v paměti, situace definuje stav (jejich množinu), akce realizuje změnu stavu,
  - přirozený model lidského řešení problémů,
- Logické systémy reprezentace lze chápat i jako speciální tvar produkčních systémů
  - logická pravidla jsou speciálním případem produkčních pravidel,
  - při omezení na Hornovy klauzule lze usuzovat přímým řetězením,
- Analogie s činností mozku
  - pravidla . . . dlouhodobá paměť,
  - báze dat . . . krátkodobá operativní paměť,
  - inference . . . kognitivní funkce,
- Souvislost s procedurálním programem
  - také vykonává instrukce nad daty,
  - ale silná **modularita** - neuspořádaná množina pravidel vs posloupnost instrukcí,
  - interakce mezi pravidly je velmi omezená (přes obsah paměti).

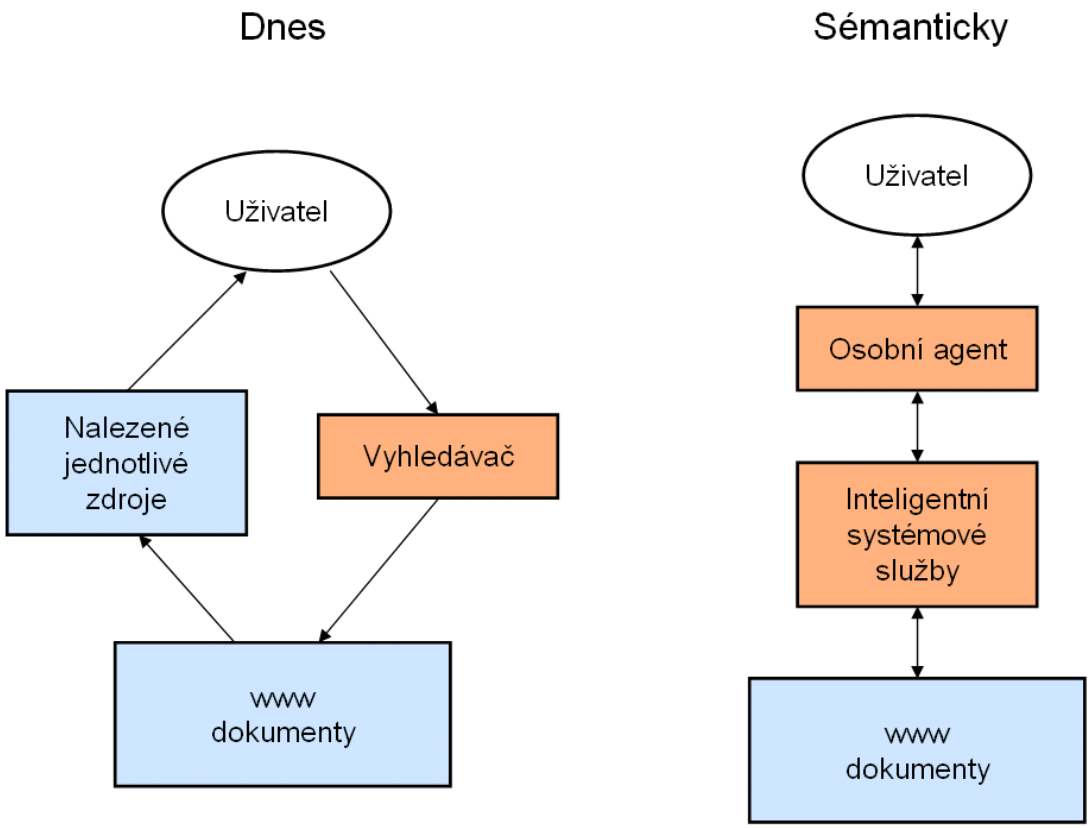
Praktické využití – sémantický web (1)



- HTML reprezentace – lidsky srozumitelná ale nevhodná pro automatické zpracování
  - vyhledávání založené na klíčových slovech má omezené možnosti
    - nedostatečná úplnost (recall) či naopak přesnost (precision)
    - citlivost na změnu klíčových slov (např. záměna synonym)
    - výsledkem vyhledávání jsou jednotlivé stránky či dokumenty – integrace je na člověku
    - v důsledku nejde o automatické získávání informací, ale zjišťování jejich umístění
  - podobná omezení při jiných častých úkonech
    - údržba obsahu stránek – zastarávání, nekonzistence apod.
    - získávání znalostí – nelze dolování dat jako u databází (různorodost, rozptýlenost)
    - porovnávání obsahu – porovnej všechny výrobky daného typu (ne ale v jednom katalogu, ale u různých prodejců, v různých zemích, v různých měnách, apod.)

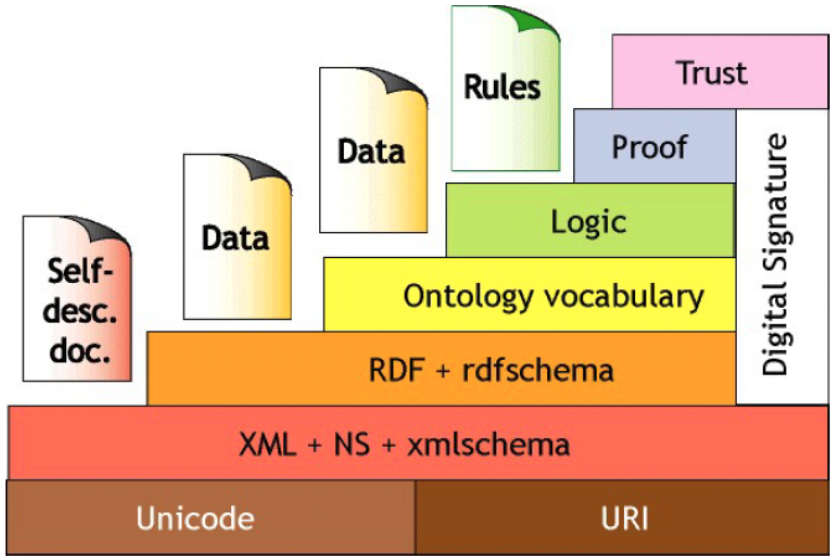
Praktické využití – sémantický web (2)

- Sémantický web
  - je rozšířením současného webu – informace mají přidělen dobře definovaný význam,
  - dovoluje vyšší míru automatizovaného (strojového) zpracování,
  - využití SW agentů – autonomních a předcházejících požadavky uživatele.



Praktické využití – sémantický web (3)

- Použité prvky a technologie
  - konceptualizace dat na www ve formě ontologií,
  - standardizovaný popis www zdrojů,
  - XML – zápis strukturovaných metadat – dat o datech,
  - RDF (Resource Description Framework) – vyjádření vztahů mezi metadatovými prvky – syntaktický zápis v XML, identifikátory URI (Universal Resource Identifier) pro pojmenovávání,
  - RDF Schema (Resource Description Framework) – jazyk pro popis ontologie – vyjádření sémantiky popisovaných dat.



Antoniou, van Harmelen: A Semantic Web Primer, MIT Press, 2004

Praktické využití – sémantický web (4) – příklad

HTML XML RDF(S)

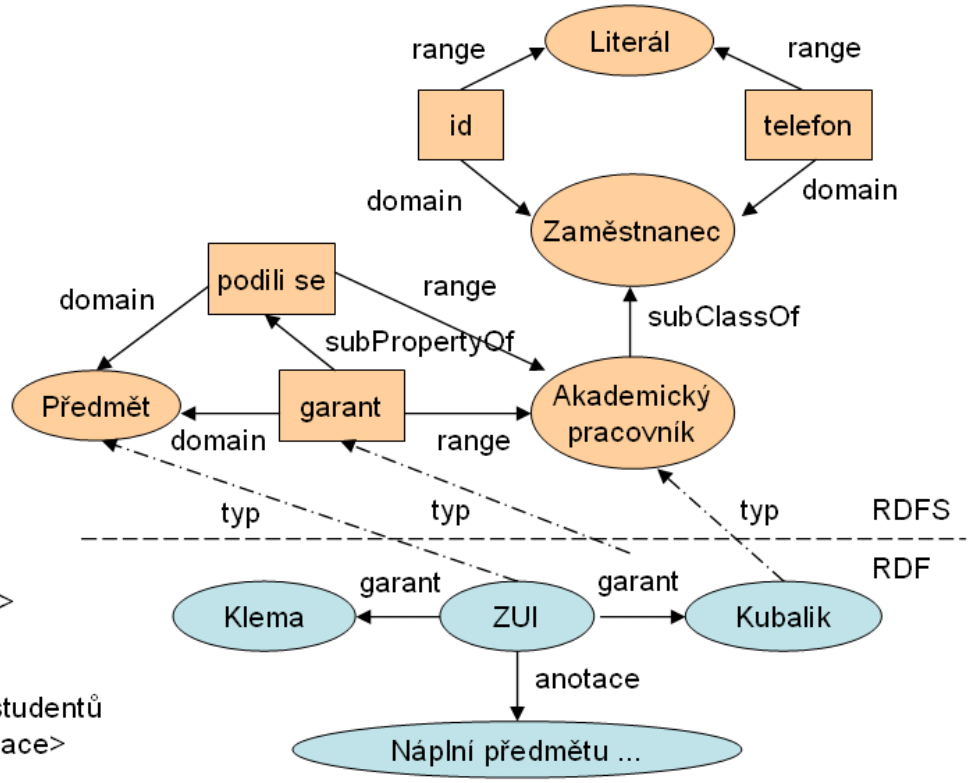
Základy umělé inteligence

Garanti: Jiří Kléma, Jiří Kubalík

Náplní předmětu je seznámení studentů se základními cíli umělé inteligence.

```
<h1>Základy umělé inteligence</h1>
<h2>Garanti: Jiří Kléma, Jiří Kubalík</h2>
Náplní předmětu je seznámení studentů
se základními cíli umělé inteligence.
```

```
<predmet>
 <nazev>Základy umělé inteligence</nazev>
 <garant>Jiří Kléma</garant>
 <garant>Jiří Kubalík</garant>
 <anotace>Náplní předmětu je seznámení studentů
  se základními cíli umělé inteligence.</anotace>
</predmet>
```



Přechod od HTML k ontologické konceptualizaci

Shrnutí

- Je obtížnější tvořit a spravovat znalostí o proměnlivém světě.

Doporučené doplňky – zdroje přednášky

:: Četba

- Russel, Norvig: **AI: A Modern Approach**, Logical Agents, chapter 7
  - reprezentace z pohledu inteligentního agenta,
  - dostupná v pdf – `http://aima.cs.berkeley.edu/newchap07.pdf`.
- Mařík a kol. **Umělá inteligence 1**
  - kapitola Reprezentace znalostí: základní formáty, logika, sémantické sítě, rámce,
  - kapitola Řešení úloh a dokazování vět: predikátová logika a důkazní prostředky.
- Mařík a kol. **Umělá inteligence 2**
  - kapitola Znalostní inženýrství: praktická, znalostní systémy v konkrétních aplikacích.