## Logický agent, výroková logika

Aleš Horák

E-mail: `hales@fi.muni.cz`

`http://nlp.fi.muni.cz/uui/`

Obsah:







## Logický agent

**logický agent** = agent využívající **znalosti** (*knowledge-based agent*)

2 koncepty:
- – **reprezentace** znalostí (*knowledge representation*)
- – **vyvozování** znalostí (*knowledge reasoning*) → **inference**

rozdíly od prohledávání stavového prostoru:

- ➜ **znalost** při prohledávání stavového prostoru → jen **zadané funkce** (přechodová funkce, cílový test,. . . )
- ➜ znalosti logického agenta → **obecná forma** umožňující **kombinace** těchto znalostí

**obecné znalosti** – důležité v **částečně pozorovatelných** prostředích (*partially observable* environments)

**flexibilita** logického agenta:
- ➜ schopnost řešit i **nové úkoly**
- ➜ možnost **učení** nových znalostí
- ➜ **úprava** stávajících znalostí podle stavu prostředí





## Báze znalostí

komponenty logického agenta:

| | |
|---|---|
| **inferenční stroj** (inference engine) | ⟵ algoritmy nezávislé na doméně |
| **báze znalostí** (knowledge base) | ⟵ “informace” o doméně |

báze znalostí (KB) = množina **vět** (*tvrzení*) vyjádřených v **jazyce reprezentace znalostí**

**obsah** báze znalostí:

- ➜ na začátku – tzv. **znalosti pozadí** (*background knowledge*)
- ➜ průběžně **doplňované** znalosti → úkol **tell(+KB,+Sentence)**

**akce** logického agenta:

```
% kb_agent_action (+KB,+ATime,+Percept,−Action,−NewATime)
kb_agent_action(KB,ATime,Percept,Action,NewATime):−
    make_percept_sentence(Percept,ATime,Sentence),
    tell (KB,Sentence),                      % přidáme výsledky pozorování do KB
    make_action_query(ATime,Query),
    ask(KB,Query,Action),                    % zeptáme se na další postup
    make_action_sentence(Action,ATime,ASentence),
    tell (KB,ASentence),                     % přidáme informace o akci do KB
    NewATime is ATime + 1.
```





## Návrh logického agenta

přístupy k tvorbě agenta (systému) – **deklarativní** × **procedurální** (kombinace obou)

návrh agenta → víc pohledů:

- ❑ **znalostní hledisko** – tvorba agenta → zadání znalostí pozadí, znalostí domény a cílového požadavku

  např. automatické taxi
  - – znalost mapy, dopravních pravidel, . . .
  - – požadavek – dopravit zákazníka na FI MU Brno
- ❑ **implementační hledisko** – jaké datové struktury KB obsahuje + algoritmy, které s nimi manipulují

agent musí umět:
- ➜ reprezentovat stavy, akce, . . .
- ➜ zpracovat nové vstupy z prostředí
- ➜ aktualizovat svůj vnitřní popis světa
- ➜ odvodit skryté informace o stavu světa
- ➜ odvodit vlastní odpovídající akce

## Popis světa – PEAS

**zadání světa** rozumného agenta:

- **míra výkonnosti** (*Performance measure*)
  plus body za dosažené (mezi)cíle, pokuty za nežádoucí následky
- **prostředí** (*Environment*)
  objekty ve světě, se kterými agent musí počítat, a jejich vlastnosti
- **akční prvky** (*Actuators*)
  možné součásti činnosti agenta, jeho akce se skládají z použití těchto prvků
- **senzory** (*Sensors*)
  zpětné vazby akcí agenta, podle jejich výstupů se tvoří další akce

např. zmiňované automatické taxi:

| | |
|---|---|
| *míra výkonnosti* | doprava na místo, vzdálenost, bezpečnost, bez přestupků, komfort, ... |
| *prostředí* | ulice, křižovatky, účastníci provozu, chodci, počasí, ... |
| *akční prvky* | řízení, plyn, brzda, houkačka, blinkry, komunikátory, ... |
| *senzory* | kamera, tachometr, počítač kilometrů, senzory motoru, GPS, ... |

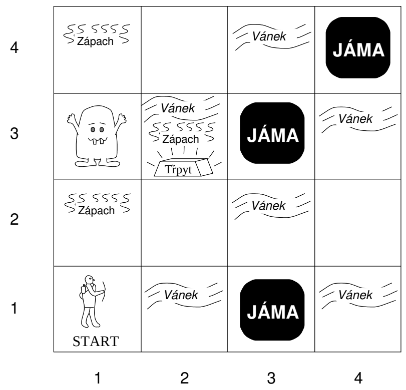




## Wumpusova jeskyně

PEAS zadání Wumpusovy jeskyně:

- **P – míra výkonnosti**
  zlato +1000, smrt -1000, -1 za krok, -10 za užití šípu
- **E – prostředí**
  Místnosti vedle Wumpuse zapáchají
  V místnosti vedle jámy je vánek
  V místnosti je zlato ⇔ je v ní třpyt
  Výstřel zabije Wumpuse, pokud jsi obrácený k němu
  Výstřel vyčerpá jediný šíp, který máš
  Zvednutím vezmeš zlato ve stejné místnosti
  Položení odloží zlato v aktuální místnosti
- **A – akční prvky**
  Otočení vlevo, Otočení vpravo, Krok dopředu,
  Zvednutí, Položení, Výstřel
- **S – senzory**
  Vánek, Třpyt, Zápach, Náraz do zdi, Chroptění Wumpuse







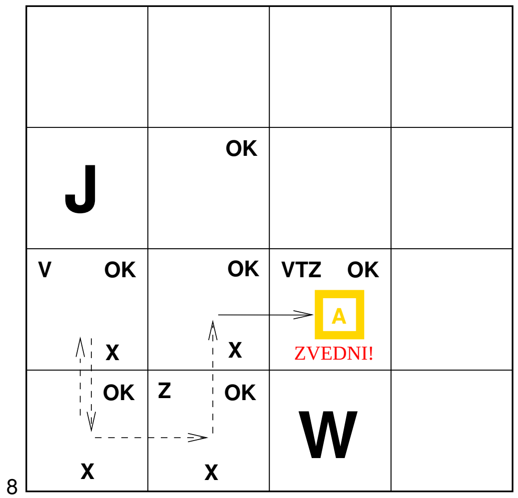

## Vlastnosti problému Wumpusovy jeskyně

| | |
|---|---|
| *pozorovatelné* | **ne**, jen lokální vnímání |
| *deterministické* | **ano**, přesně dané výsledky |
| *episodické* | **ne**, sekvenční na úrovni akcí |
| *statické* | **ano**, Wumpus a jámy se nehýbou |
| *diskrétní* | **ano** |
| *více agentů* | **ne**, Wumpus je spíše vlastnost prostředí |





## Průzkum Wumpusovy jeskyně



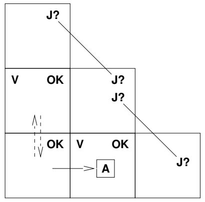

| | | |
|---|---|---|
| A | = | Agent |
| V | = | Vánek |
| T | = | Třpyt |
| OK | = | bezpečí |
| J | = | Jáma |
| Z | = | Zápach |
| X | = | navštíveno |
| W | = | Wumpus |

## PRŮZKUM WUMPUSOVY JESKYNĚ – PROBLÉMY

základní vlastnost logického vyvozování:

*Kdykoliv agent dospěje k* ***závěru*** *z daných informací* $\longrightarrow$ *tento závěr je* ***zaručeně*** *správný, pokud jsou správné dodané informace.*

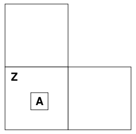
**obtížné situace:**




Vánek v $(1,2)$ i v $(2,1)$ $\Rightarrow$ žádná bezpečná akce

Při předpokladu uniformní distribuce děr

$\longrightarrow$ díra v $(2,2)$ má pravděpodobnost 0.86, na krajích 0.31




Zápach v $(1,1)$ $\Rightarrow$ nemůže se pohnout

je možné použít **donucovací strategii** (*strategy of coercion*):

1. Výstřel jedním ze směrů
2. byl tam Wumpus $\Rightarrow$ je mtrvý $\Rightarrow$ bezpečné
3. nebyl tam Wumpus $\Rightarrow$ bezpečný směr





## LOGIKA

**Logika** = *syntaxe* a *sémantika* formálního jazyka pro reprezentaci informací umožňující vyvozování **závěrů**

**Syntaxe** definuje všechny *dobře utvořené věty* jazyka

**Sémantika** definuje "*význam*" vět $\Rightarrow$ definuje **pravdivost** vět v jazyce (v závislosti na *možném světě*)

např. jazyk aritmetiky:

- ➜ $x + 2 \geq y$ je dobře utvořená věta; $x2 + y >$ není věta
- ➜ $x + 2 \geq y$ je pravda $\Leftrightarrow$ číslo $x + 2$ není menší než číslo $y$
- ➜ $x + 2 \geq y$ je pravda ve světě, kde $x = 7,\ y = 1$
- ➜ $x + 2 \geq y$ je nepravda ve světě, kde $x = 0,\ y = 6$

zápis na papíře v libovolné syntaxi $\longrightarrow$ v KB se jedná o **konfiguraci** (částí) agenta

vlastní **vyvozování** $\longrightarrow$ generování a manipulace s těmito konfiguracemi





## DŮSLEDEK

**Důsledek** (vyplývání, *entailment*) – jedna věc **logicky vyplývá** z druhé (je jejím důsledkem):

$$KB \models \alpha$$

Z báze znalostí $KB$ vyplývá věta $\alpha$ $\Leftrightarrow$ $\alpha$ je pravdivá ve *všech světech*, kde je $KB$ pravdivá

např.:

➜ $KB$ obsahuje věty – "Češi vyhráli"

– "Slováci vyhráli"

z $KB$ pak vyplývá – "Buď Češi vyhráli nebo Slováci vyhráli"

➜ z $x + y = 4$ vyplývá $4 = x + y$

Důsledek je vztah mezi větami (*syntaxe*), který je založený na *sémantice*.





## MODEL

možný svět = **model** … formálně strukturovaný (abstraktní) svět, umožňuje vyhodnocení pravdivosti

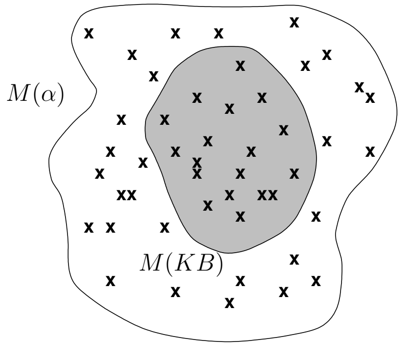
říkáme: $m$ **je model** věty $\alpha$ $\Leftrightarrow$ $\alpha$ je pravdivá v $m$

$M(\alpha)$ … množina všech modelů věty $\alpha$

$$KB \models \alpha \quad \Leftrightarrow \quad M(KB) \subseteq M(\alpha)$$

např.: $KB =$ "Češi vyhráli" $\wedge$ "Slováci vyhráli"

$\alpha =$ "Češi vyhráli"



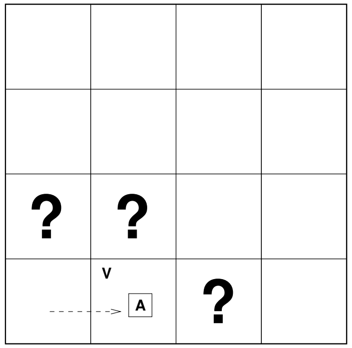
## Vyplývání ve Wumpusově jeskyni

situace:

- v $[1,1]$ nedetekováno nic
- krok doprava, v $[2,1]$ Vánek

uvažujeme možné *modely* pro ‘**?**’

(budou nás zajímat jen Jámy)



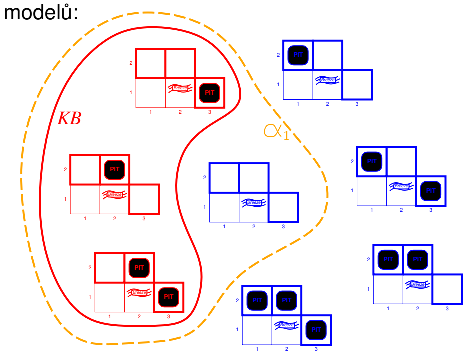

3 pole s Booleovskými možnostmi $\{T, F\}$ $\Rightarrow$ $2^3 = 8$ možných modelů





## Modely ve Wumpusově jeskyni

uvažujeme všech 8 možných modelů:




$KB =$ pravidla Wumpusovy jeskyně $+$ pozorování

$\alpha_1 =$ “$[1,2]$ je bezpečné pole” $KB \models \alpha_1$

$\alpha_2 =$ “$[2,2]$ je bezpečné pole” $KB \not\models \alpha_2$

kontrola modelů $\longrightarrow$ jednoduchý způsob **logické inference**





## Inference

Vyvozování požadovaných důsledků – **inference**

$KB \vdash_i \alpha \ldots$ věta $\alpha$ může být **vyvozena** z $KB$ pomocí (procedury) $i$ ($i$ odvodí $\alpha$ z $KB$)

všechny možné důsledky $KB$ jsou “kupka sena”; $\alpha$ je jehla

vyplývání = jehla v kupce sena; inference = její nalezení

**Bezespornost**: $i$ je bezesporná $\Leftrightarrow$ $\forall KB \vdash_i \alpha$ $\Rightarrow$ $KB \models \alpha$

**Úplnost**: $i$ je úplná $\Leftrightarrow$ $\forall KB \models \alpha$ $\Rightarrow$ $KB \vdash_i \alpha$

Vztah k *reálnému světu*:

Pokud je $KB$ **pravdivá v reálném světě** $\Rightarrow \forall$ věta $\alpha$ vyvozená z $KB$ pomocí **bezesporné inference** je také pravdivá ve skutečném světě

Jestliže máme sémantiku “pravdivou” v reálném světě $\longrightarrow$ můžeme vyvozovat závěry o skutečném světě pomocí logiky





## Výroková logika

**Výroková logika** – nejjednodušší logika, ilustruje základní myšlenky

- **výrokové symboly** $\mathbf{P_1}, \mathbf{P_2}, \ldots$ jsou věty
- **negace** – $S$ je věta $\Rightarrow$ $\neg S$ je věta
- **konjunkce** – $S_1$ a $S_2$ jsou věty $\Rightarrow$ $S_1 \wedge S_2$ je věta
- **disjunkce** – $S_1$ a $S_2$ jsou věty $\Rightarrow$ $S_1 \vee S_2$ je věta
- **implikace** – $S_1$ a $S_2$ jsou věty $\Rightarrow$ $S_1 \Rightarrow S_2$ je věta
- **ekvivalence** – $S_1$ a $S_2$ jsou věty $\Rightarrow$ $S_1 \Leftrightarrow S_2$ je věta

## Sémantika výrokové logiky

- ➜ každý model musí určit **pravdivostní hodnoty výrokových symbolů**
  např.: $m_1 = \{P_1 = false, P_2 = false, P_3 = true\}$
- ➜ **pravidla pro vyhodnocení pravdivosti** u složených výroků pro model $m$:

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\neg S$ | je $true$ | $\Leftrightarrow$ | $S$ | je $false$ | | | |
| $S_1 \wedge S_2$ | je $true$ | $\Leftrightarrow$ | $S_1$ | je $true$ | **a** | $S_2$ | je $true$ |
| $S_1 \vee S_2$ | je $true$ | $\Leftrightarrow$ | $S_1$ | je $true$ | **nebo** | $S_2$ | je $true$ |
| $S_1 \Rightarrow S_2$ | je $true$ | $\Leftrightarrow$ | $S_1$ | je $false$ | **nebo** | $S_2$ | je $true$ |
| tj. | je $false$ | $\Leftrightarrow$ | $S_1$ | je $true$ | **a** | $S_2$ | je $false$ |
| $S_1 \Leftrightarrow S_2$ | je $true$ | $\Leftrightarrow$ | $S_1 \Rightarrow S_2$ | je $true$ | **a** | $S_2 \Rightarrow S_1$ | je $true$ |

- ➜ **rekurzivním procesem** vyhodnotíme lib. větu:
  $\neg P_1 \wedge (P_2 \vee P_3)$ = $true \wedge (false \vee true) = true \wedge true = true$

pravdivostní tabulka:

| $P$ | $Q$ | $\neg P$ | $P \wedge Q$ | $P \vee Q$ | $P \Rightarrow Q$ | $P \Leftrightarrow Q$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $false$ | $false$ | $true$ | $false$ | $false$ | $true$ | $true$ |
| $false$ | $true$ | $true$ | $false$ | $true$ | $true$ | $false$ |
| $true$ | $false$ | $false$ | $false$ | $true$ | $false$ | $false$ |
| $true$ | $true$ | $false$ | $true$ | $true$ | $true$ | $true$ |





## Tvrzení pro Wumpusovu jeskyni

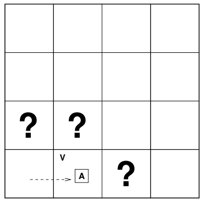
Definujeme výrokové symboly $J_{i,j}$ je pravda $\Leftrightarrow$ V $[i,j]$ je **Jáma**.
a $V_{i,j}$ je pravda $\Leftrightarrow$ V $[i,j]$ je **Vánek**.

**báze znalostí** $KB$:
- pravidlo pro $[1,1]$: $R_1$: $\neg J_{1,1}$
- pozorování: $R_2$: $\neg V_{1,1}$
  $R_3$: $V_{2,1}$
- pravidla pro vztah Jámy a Vánku:
  "Jámy způsobují Vánek ve vedlejších místnostech"

  $R_4'$: $V_{1,1} \Leftarrow (J_{1,2} \vee J_{2,1})$
  $R_5'$: $V_{2,1} \Leftarrow (J_{1,1} \vee J_{2,2} \vee J_{3,1})$

  "V poli je Vánek **právě tehdy, když** je ve vedlejším poli Jáma."

  $R_4$: $V_{1,1} \Leftrightarrow (J_{1,2} \vee J_{2,1})$
  $R_5$: $V_{2,1} \Leftrightarrow (J_{1,1} \vee J_{2,2} \vee J_{3,1})$
- $KB = R_1 \wedge R_2 \wedge R_3 \wedge R_4 \wedge R_5$








## Pravdivostní tabulka pro inferenci

| $V_{1,1}$ | $V_{2,1}$ | $J_{1,1}$ | $J_{1,2}$ | $J_{2,1}$ | $J_{2,2}$ | $J_{3,1}$ | $KB$ | $\alpha_1$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $false$ | $false$ | $false$ | $false$ | $false$ | $false$ | $false$ | $false$ | $true$ |
| $false$ | $false$ | $false$ | $false$ | $false$ | $false$ | $true$ | $false$ | $true$ |
| $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$ |
| $false$ | $true$ | $false$ | $false$ | $false$ | $false$ | $false$ | $false$ | $true$ |
| $false$ | $true$ | $false$ | $false$ | $false$ | $false$ | $true$ | $\underline{true}$ | $\underline{true}$ |
| $false$ | $true$ | $false$ | $false$ | $false$ | $true$ | $false$ | $\underline{true}$ | $\underline{true}$ |
| $false$ | $true$ | $false$ | $false$ | $false$ | $true$ | $true$ | $\underline{true}$ | $\underline{true}$ |
| $false$ | $true$ | $false$ | $false$ | $true$ | $false$ | $false$ | $false$ | $true$ |
| $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$ |
| $true$ | $true$ | $true$ | $true$ | $true$ | $true$ | $true$ | $false$ | $false$ |

$KB =$ pravidla Wumpusovy jeskyně $+$ pozorování
$\alpha_1 =$ "$[1,2]$ je bezpečné pole"





## Inference kontrolou modelů

**Kontrola** všech **modelů *do hloubky*** je bezesporná a úplná (pro konečný počet výrokových symbolů)

```
% tt_entails (+KB,+Alpha)
tt_entails(KB,Alpha):-proposition_symbols(Symbols,[KB,Alpha]),
    tt_check_all(KB,Alpha,Symbols,[]).

% tt_check_all (+KB,+Alpha,+Symbols,+Model)
tt_check_all(KB,Alpha,[],Model):-pl_true(KB,Model),!,pl_true(Alpha,Model).
tt_check_all(KB,Alpha,[],Model):-!,fail.
tt_check_all(KB,Alpha,[P|Symbols],Model):-
    tt_check_all(KB,Alpha,Symbols,[P-true|Model]),
    tt_check_all(KB,Alpha,Symbols,[P-false|Model]).
```

$O(2^n)$ pro $n$ symbolů, NP-úplný problém

## Logická ekvivalence

Dva výroky jsou **logicky ekvivalentní** právě tehdy, když jsou pravdivé ve stejných modelech:

$$\alpha \equiv \beta \quad \Leftrightarrow \quad \alpha \models \beta \text{ a } \beta \models \alpha$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| $(\alpha \wedge \beta)$ | $\equiv$ | $(\beta \wedge \alpha)$ | komutativita $\wedge$ |
| $(\alpha \vee \beta)$ | $\equiv$ | $(\beta \vee \alpha)$ | komutativita $\vee$ |
| $((\alpha \wedge \beta) \wedge \gamma)$ | $\equiv$ | $(\alpha \wedge (\beta \wedge \gamma))$ | asociativita $\wedge$ |
| $((\alpha \vee \beta) \vee \gamma)$ | $\equiv$ | $(\alpha \vee (\beta \vee \gamma))$ | asociativita $\vee$ |
| $\neg(\neg\alpha)$ | $\equiv$ | $\alpha$ | eliminace dvojí negace |
| $(\alpha \Rightarrow \beta)$ | $\equiv$ | $(\neg\beta \Rightarrow \neg\alpha)$ | kontrapozice |
| $(\alpha \Rightarrow \beta)$ | $\equiv$ | $(\neg\alpha \vee \beta)$ | eliminace implikace |
| $(\alpha \Leftrightarrow \beta)$ | $\equiv$ | $((\alpha \Rightarrow \beta) \wedge (\beta \Rightarrow \alpha))$ | eliminace ekvivalence |
| $\neg(\alpha \wedge \beta)$ | $\equiv$ | $(\neg\alpha \vee \neg\beta)$ | de Morgan |
| $\neg(\alpha \vee \beta)$ | $\equiv$ | $(\neg\alpha \wedge \neg\beta)$ | de Morgan |
| $(\alpha \wedge (\beta \vee \gamma))$ | $\equiv$ | $((\alpha \wedge \beta) \vee (\alpha \wedge \gamma))$ | distributivita $\wedge$ nad $\vee$ |
| $(\alpha \vee (\beta \wedge \gamma))$ | $\equiv$ | $((\alpha \vee \beta) \wedge (\alpha \vee \gamma))$ | distributivita $\vee$ nad $\wedge$ |





## Platnost a splnitelnost

➜ Výrok je **platný** $\Leftrightarrow$ je pravdivý ve **všech** modelech
  např.: $true, \quad A \vee \neg A, \quad A \Rightarrow A, \quad (A \wedge (A \Rightarrow B)) \Rightarrow B$

Platnost je spojena s inferencí pomocí **věty o dedukci**:
  $KB \models \alpha \quad \Leftrightarrow \quad (KB \Rightarrow \alpha)$ je platný výrok

➜ Výrok je **splnitelný** $\Leftrightarrow$ je pravdivý v **některých** modelech
  např.: $A \vee B, \quad C$

Výrok je **nesplnitelný** $\Leftrightarrow$ je **nepravdivý ve všech** modelech
  např.: $A \wedge \neg A$

Splnitelnost je spojena s inferencí pomocí **důkazu** $\alpha$ **sporem** (*reductio ad absurdum*):
  $KB \models \alpha \quad \Leftrightarrow \quad (KB \wedge \neg\alpha)$ je nesplnitelný





## Důkazové metody

❑ **kontrola modelů**
- procházení pravdivostní tabulky (vždycky exponenciální v $n$)
- vylepšené prohledávání s navracením (*improved backtracking*), např. Davis–Putnam–Logemann–Loveland
- heuristické prohledávání prostoru modelů (bezesporné, ale neúplné)

❑ **aplikace inferenčních pravidel**
- legitimní (bezesporné) generování nových výroků ze starých
- **důkaz** = sekvence aplikací inferenčních pravidel
  je možné použít inferenční pravidla jako operátory ve standardních prohledávacích algoritmech
- typicky vyžaduje překlad vět do **normální formy**





## Dopředné a zpětné řetězení

**Hornovy klauzule:** $KB$ = **konjunkce Hornových klauzulí**

$$\text{Hornova klauzule} = \begin{cases} \text{výrokový symbol; nebo} \\ (\text{konjunkce symbolů}) \Rightarrow \text{symbol} \end{cases}$$

např.: $KB = C \wedge (B \Rightarrow A) \wedge (C \wedge D \Rightarrow B)$

pravidlo **Modus Ponens** – pro $KB$ z Hornových klauzulí je **úplné**

$$\frac{\alpha_1, \ldots, \alpha_n, \qquad \alpha_1 \wedge \cdots \wedge \alpha_n \Rightarrow \beta}{\beta}$$

pravidla pro logickou ekvivalenci se taky dají použít pro inferenci

inference Hornových klauzulí $\longrightarrow$ algoritmus **dopředného** nebo **zpětného řetězení**

oba tyto algoritmy jsou přirozené a mají **lineární** časovou složitost

## Dopředné řetězení

Idea: aplikuj pravidlo, jehož premisy jsou splněné v $KB$

přidej jeho důsledek do $KB$

pokračuj do doby, než je nalezena odpověď

$KB$:

$P \Rightarrow Q$

$L \wedge M \Rightarrow P$

$B \wedge L \Rightarrow M$

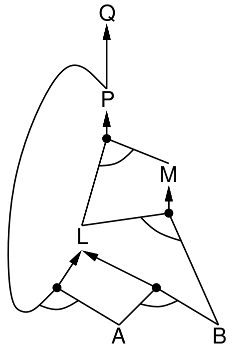
$A \wedge P \Rightarrow L$

$A \wedge B \Rightarrow L$

$A$

$B$

AND-OR graf $KB$:








## Algoritmus dopředného řetězení

```
:- op( 800, fx , if ),
   op( 700, xfx , then),
   op( 300, xfy , or ),
   op( 200, xfy , and).

forward :- new_derived_fact( P), !,                        % A new fact
    write( 'Derived:␣' ), write( P), nl,
    assert( fact( P)),
    forward                                                % Continue
    ;
    write( 'No␣more␣facts').                               % All facts derived

new_derived_fact( Concl) :- if Cond then Concl,            % A rule
    not(fact( Concl)),                                     % Rule's conclusion not yet a fact
    composed_fact( Cond).                                  % Condition true?

composed_fact( Cond) :- fact( Cond).                       % Simple fact
composed_fact( Cond1 and Cond2) :- composed_fact( Cond1),
    composed_fact( Cond2).                                 % Both conjuncts true
composed_fact( Cond1 or Cond2) :- composed_fact( Cond1)
    ; composed_fact( Cond2).
```





## Dopředné řetězení – příklad

$P \Rightarrow Q$

$L \wedge M \Rightarrow P$

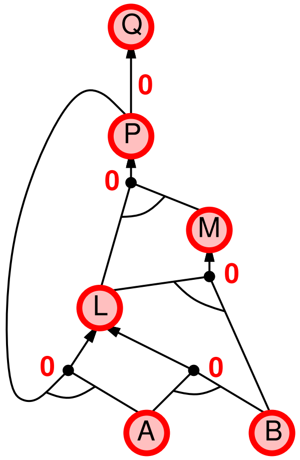
$B \wedge L \Rightarrow M$

$A \wedge P \Rightarrow L$

$A \wedge B \Rightarrow L$

$A$

$B$








## Zpětné řetězení

Idea: pracuje **zpětně** od dotazu $q$

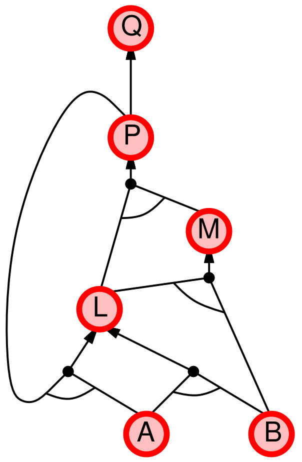
zkontroluj, jestli není $q$ už známo

**dokaž** zpětným řetězením všechny **premisy** nějakého pravidla, které má $q$ jako důsledek

**kontrola cyklů** – pro každý podcíl se nejprve podívej, jestli už nebyl řešen (tj. pamatuje si $true$ i $false$ výsledek)

## Zpětné řetězení – příklad

$P \Rightarrow Q$
$L \wedge M \Rightarrow P$
$B \wedge L \Rightarrow M$
$A \wedge P \Rightarrow L$
$A \wedge B \Rightarrow L$
$A$
$B$








## Porovnání dopředného a zpětného řetězení

- **dopředné řetězení** je řízeno **daty**
  - automatické, nevědomé zpracování
  - např. rozpoznávání objektů, rutinní rozhodování
  - může udělat hodně nadbytečné práce bez vztahu k dotazu/cíli
- **zpětné řetězení** je řízeno **dotazem**
  - vhodné pro hledání odpovědí na konkrétní dotaz
  - např. "Kde jsou moje klíče?" "Jak se mám přihlásit na PGS?"
  - složitost zpětného řetězení **může** být **mnohem menší** než lineární vzhledem k velikosti $KB$

obecný inferenční algoritmus – **rezoluce**

zpracovává formule v **konjunktivní normální formě** (konjunkce disjunkcí literálů)

pro výrokovou logiku je rezoluce **bezesporná** a **úplná**