

# **Principy programovacích jazyků**

## **PB006**

## Náplň kursu

Přehled programovacích paradigmat, vlastností programovacích jazyků a zkoumání teoretické podstaty jevů, které se v programovacích jazycích vyskytují.

## Přednáška

Podzim 2012: úterý 18:00–19:40 D1

## Konsultace

Konsultační hodiny (do 21. 12.): úterý 15:30–16:50 v B419

## Aktuální informace

<http://www.fi.muni.cz/~libor/vyuka/PB006/>

## Literatura

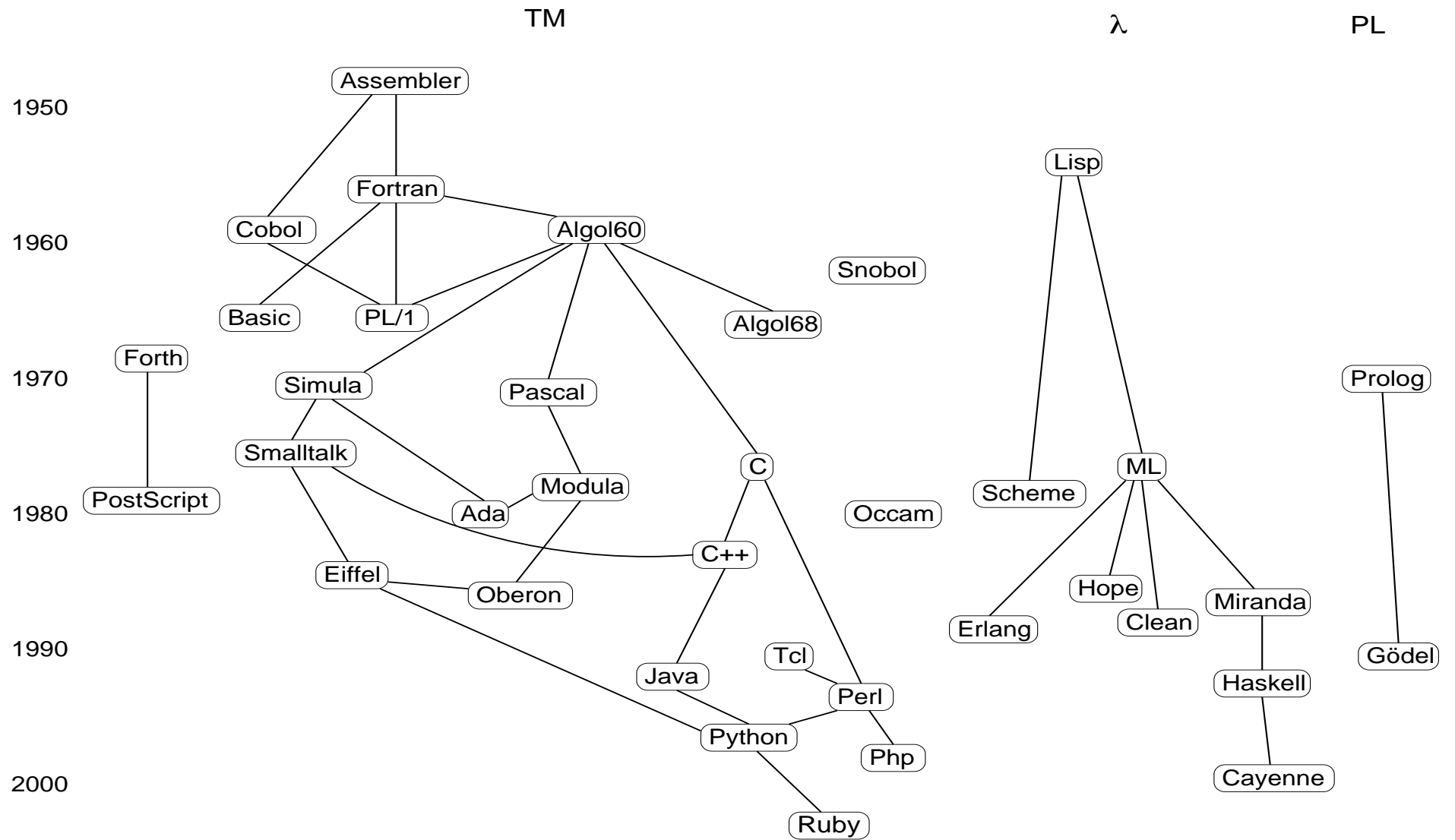
- D. A. Watt: *Programming Languages Concepts and Paradigms*, Prentice Hall, 1990
- R. D. Tennent: *Principles of Programming Languages*, Prentice Hall, 1981
- T. W. Pratt, M. V. Zelkowitz: *Programming Languages – Design and Implementation*, Prentice Hall, 1996

# Úvod

Historie programovacích jazyků

Paradigmata

Klasifikace jazyků



# Klasifikace programovacích jazyků

## Paradigma

- imperativní / funkcionální / logické / CLP
- procedurální / objektově orientované
- deterministické / nedeterministické
- sekvenční / paralelní

## Struktura programu

- amorfní / blokové / modulární / objektové

## Typový systém

- netypované / typované
- odvozování typů: statické / dynamické
- typy:
  - \* monomorfní / polymorfní
  - \* parametrický / podtypový / ad hoc polymorfismus

podtypy, přetížení, druhy, PTS

## Vztah k výpočtu

- kompilované / interpretované
- knihovní / dávkové / interaktivní / řízené událostmi

## Oblast nasazení

- číselné výpočty / zpracování textů / systémové programování / databáze / simulace / umělá inteligence / grafická uživatelská rozhraní / virtuální realita / web

## Doba vzniku

## Rozšíření

...



# Aspekty programovacího jazyka

## Pragmatika

- vztah k výpočtu
- implementace kompilátoru, interpretu, . . .
- použitelnost jazyka
- oblast nasazení
- úspěšnost jazyka

## Syntax

- struktura a forma programů v jazyce
- je popsána formální gramatikou, často ve dvou až třech úrovních (lexikální, bezkontextová, kontext. omezení)
- konkrétní / abstraktní syntax

## Sémantika

- význam
- vztah mezi programem a výpočetním modelem
- denotační / operační sémantika
- axiomatická sémantika

# Syntax

Konkrétní a abstraktní syntax

Lexikální syntax

Frázová syntax

Typová a kontexová omezení

## Konkrétní syntax

Popsána formální gramatikou  $G = (N, \Sigma, P, S)$ ,

$N, \Sigma, P$  konečné,  $N \cap \Sigma = \emptyset$ ,  $S \in N$ ,

$P \subseteq ((N \cup \Sigma)^* \times N \times (N \cup \Sigma)^*) \times (N \cup \Sigma)^*$ ,

v případě programovacích jazyků tato gramatika bývá bezkontextová, tj.

$P \subseteq (N \times (N \cup \Sigma)^+) \cup \{(S, \varepsilon)\}$ .

Pro zápis bezkontextových gramatik existují různé formalismy

$$G = \left( \{ \text{Ident}, \text{Písmeno} \}, \{ 'a', 'b', '_' \}, \right. \\ \left. \{ (\text{Ident}, \text{Písmeno}), (\text{Ident}, \text{Ident Písmeno}), (\text{Ident}, \text{Ident } _ \text{Písmeno}), \right. \\ \left. (\text{Písmeno}, 'a'), (\text{Písmeno}, 'b') \}, \text{Ident} \right)$$

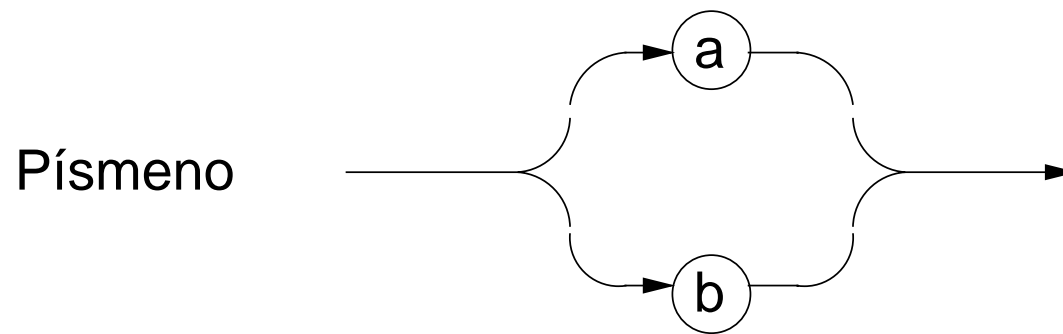
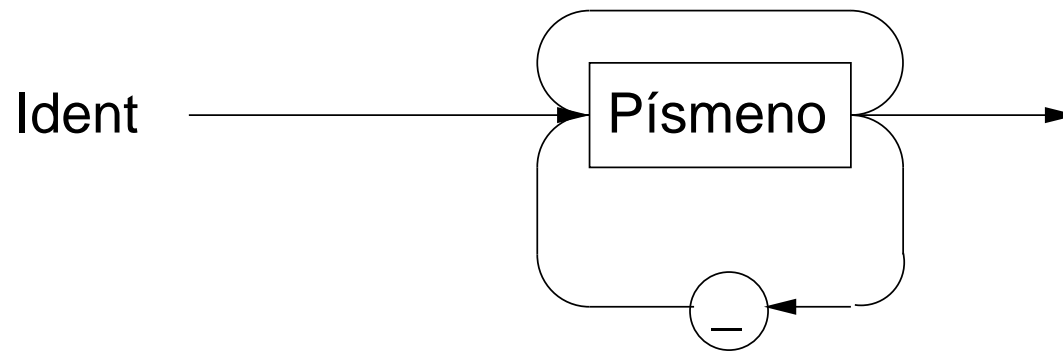
BNF

$$\begin{aligned} \text{Ident} &::= \text{Písmeno} \mid \text{Ident Písmeno} \mid \text{Ident } _ \text{Písmeno} \\ \text{Písmeno} &::= a \mid b \end{aligned}$$

EBNF

$$\begin{aligned} \text{Ident} &::= \text{Písmeno} (\text{Písmeno} \mid _ \text{Písmeno})^* \\ \text{Písmeno} &::= a \mid b \end{aligned}$$

Syntaktický diagram:



Syntax programovacího jazyka bývá obvykle popsána ve více úrovních.

### Lexikální syntax – mikrosyntax

Popisuje lexikální strukturu jazyka. Slouží k vymezení lexika – množiny *lexikálních atomů* neboli *lexémů*. Bývá popsána regulární gramatikou nebo jednoduchou bezkontextovou gramatikou. Terminály gramatiky jsou znaky. Vlastní program je pak definován jen jako posloupnost lexikálních atomů.

Mikrosyntax lze přirovnat k morfologii v přirozeném jazyce – tvoří jeho slovník (*λεξικόν*).

Lexikální syntax nejen vymezuje lexémy, ale i způsob, jak je rozpoznat ve vstupním proudu znaků. Ve většině jazyků musí být některé dvojice sousedních lexémů odděleny tzv. *bílým místem*. Proto je další součástí lexikální syntaxe i syntax tzv. *bílého místa* a *komentářů*.

Důsledek: V jazycích se zanořovanými komentáři nestačí pro popis mikrosyntaxe regulární gramatika.

## Přístupy k bílým znakům coby oddělovačům lexémů

- Bílé místo nehraje žádnou roli [Fortran, Cobol]. Neostrá hranice mezi lexikální a syntaktickou analýzou, víceméně ad hoc. (Historická chyba ve fortranském programu `do 200 i = 0, 99 / do200i = 0.99` )
- Hranice mezi lexémy je často zřejmá z jejich lexikální syntaxe; pokud ne, jsou lexémy jsou odděleny aspoň jedním bílým znakem nebo komentářem [většina jazyků].
- Jazyky s liberální lexikální syntaxí jmen tedy častěji vyžadují (aspoň jednu) mezeru mezi lexémy [Agda].
- Šířka bílého místa hraje roli na začátcích řádků, je tedy významná velikost odsazení [Iswim, Python, Haskell].
- Šířka bílého místa kdekoliv v textu je významná [„dvourozměrné“ jazyky – Epigram].

**Poznámka:** Jazyky jako Python jsou dalším příkladem toho, kdy k popisu mikrosyntaxe nestačí regulární gramatika. Lexikální analyzátor počítá zanoření a přidává dodatečné lexémy „nárůst zanoření“ (`{`), „stejně zanoření“ (`;`), „pokles zanoření“ (`}`).



## Lexikální syntax komentářů

- komentáře v závorkách – zanořitelné / nezanořitelné
- komentáře řádkové – vždy nezanořitelné
- komentáře autodokumentační, za hlavičkami funkcí tříd, metod,...  
(Scheme, Smalltalk, Java, eLisp...)

## Frázová syntax – makrosyntax

Popisuje úplnou strukturu programu. Bývá popsána bezkontextovou gramatikou.

Terminály gramatiky jsou lexikální atomy.

Makrosyntax lze přirovnat k větné skladbě ( $\sigma\upsilon\nu\tau\acute{\alpha}\xi\iota\varsigma$ ) přirozeného jazyka – tvoří množinu správně vytvořených vět.

## Kontextová omezení

Podmínky vymezující podmnožinu jazyka generovaného gramatikou frázové syntaxe.

Obvykle zaručují, že v programu použité symboly jsou definovány/deklarovány, operátory mají správné arity, program je otypovatelný.

Kontextovým omezením se také říká *statická sémantika*.

Analogií kontextových omezení v přirozeném jazyce jsou pravidla vylučující (jinak syntakticky správné, ale nesmyslné) věty jako „Zelené myšlenky zuřivě spí.“

## Makrojazyk

Často bývá programovací jazyk  $L$  doplněn druhým jazykem  $M$  – tzv. *makrojazykem*, který *předzpracovává* program v jazyce  $L$ .

Zdrojové texty programů dávané kompilátoru (nebo interpretu) jsou programy v makrojazyce  $M$ . Tyto programy se provádějí (u makrojazyků se říká *expandují*) ještě v době překladu, typicky hned po analýze lexikální syntaxe.

Výsledek *expanze* je program v jazyce  $L$ , který jde na vstup analyzátoru frázové syntaxe.

## Příklady makrojazyků

**cpp** makrojazyk pro C; primitivní, ale lze v něm vyjádřit např. podmíněný překlad nebo vkládání textu z jiných souborů

**Scheme** v programech lze použít makrojazyk, který má tutéž syntax a stejné funkce jako Scheme

**Template Haskell** podobně v Haskellu lze použít makrojazyk se stejnou syntaxí; při expanzi se nemusí pracovat jen s textem, ale lze i s kódem převedeným do abstraktní syntaxe

**M4** univerzální makrojazyk, použitelný buď samostatně, anebo ve spojení s nějakým programovacím jazykem jako jeho předzpracující makrojazyk

# Konkrétní a abstraktní syntax

## Konkrétní syntax

- definuje vlastní jazyk
- obsahuje dostatečně mnoho terminálů, které zjednodušují a zjednoznačňují syntaktickou analýzu i čitelnost programu

## Abstraktní syntax

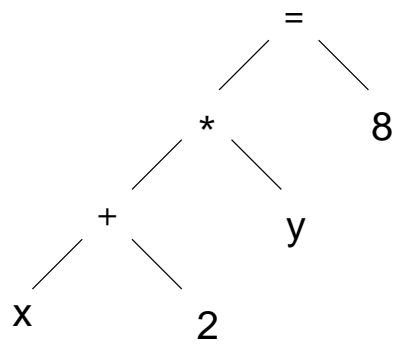
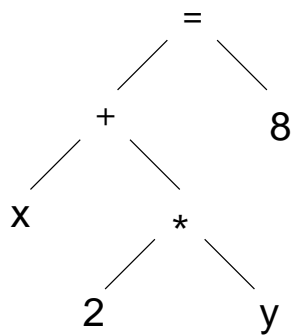
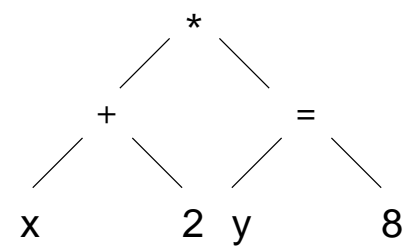
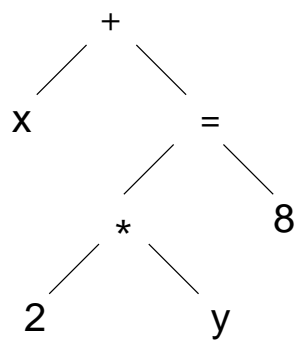
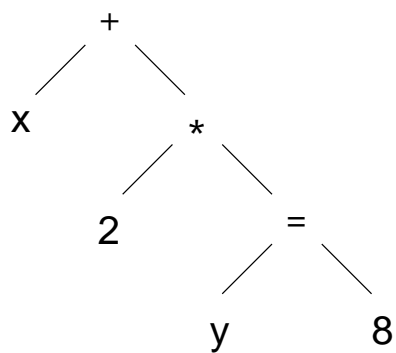
- popisuje strukturu
- je nezávislá na konkrétní reprezentaci
- obsahuje především neterminály
- terminály slouží pouze jako diskriminátory odvozovacích pravidel
- vhodná pro formální práci s jazykovými termy, např. pro definici denotační sémantiky

Příklad – abstraktní syntax výrazů

$$E ::= L \mid V \mid E \textbf{ or } E \mid E \textbf{ and } E \mid E = E \mid E < E \mid E + E \mid E * E$$

Chápána jako konkrétní syntax je gramatika nejednoznačná, od této nejednoznačnosti však abstrahujeme tím, že místo řetězců pracujeme přímo s termy, jež svou strukturou vyjadřují i odvození příslušného slova

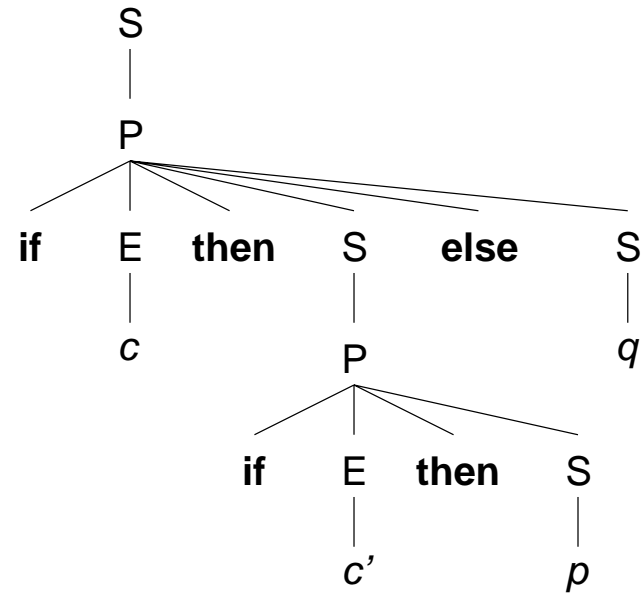
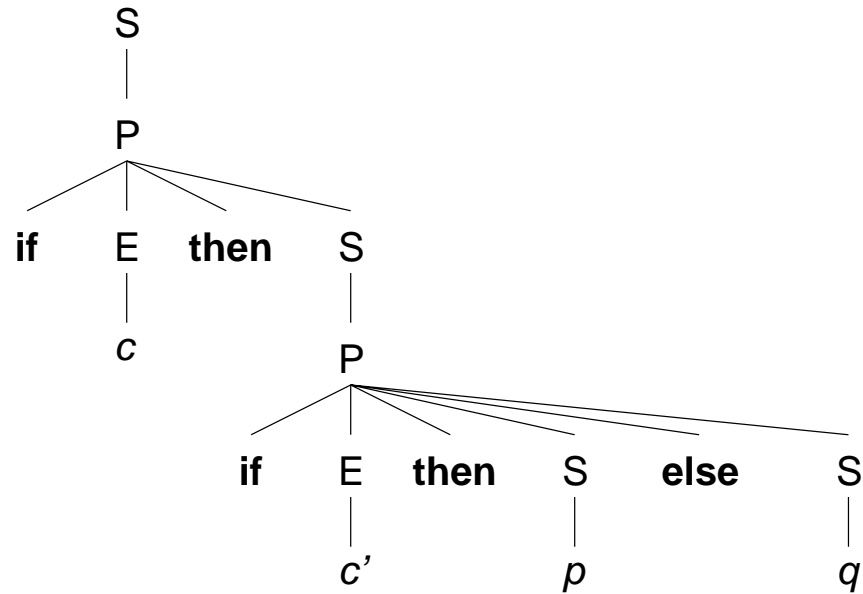
$$x + 2 * y = 8$$



$$S ::= P \mid \dots$$
$$P ::= \text{if } E \text{ then } S \mid \text{if } E \text{ then } S \text{ else } S$$
$$E ::= \dots$$



**if  $c$  then if  $c'$  then  $p$  else  $q$**



## Abstraktní syntax

Pravidla (bezkontextové) konkrétní syntaxe

$$\begin{aligned} A &::= \alpha_{1,0} B_{1,1} \alpha_{1,1} \dots \alpha_{1,r_1-1} B_{1,r_1} \alpha_{1,r_1} \\ &\quad | \alpha_{2,0} B_{2,1} \alpha_{2,1} \dots \alpha_{2,r_2-1} B_{2,r_2} \alpha_{2,r_2} \\ &\quad | \alpha_{m,0} B_{m,1} \alpha_{m,1} \dots \alpha_{m,r_m-1} B_{m,r_m} \alpha_{m,r_m} \end{aligned}$$

odpovídají disjunktímu sjednocení

$$\hat{A} = (\hat{B}_{1,1} \times \dots \times \hat{B}_{1,r_1}) \dot{\cup} (\hat{B}_{2,1} \times \dots \times \hat{B}_{2,r_2}) \dot{\cup} \dots \dot{\cup} (\hat{B}_{m,1} \times \dots \times \hat{B}_{m,r_m})$$

Protože sjednocení je disjunktní, má každý jeho člen jako příznak celé příslušné pravidlo gramatiky (v praxi však většinou zkrácené na nějaký význačný terminál, který toto pravidlo jednoznačně určuje).

Prvky sjednocení  $\hat{S}$  odpovídají slovům jazyka, ale i *s jejich derivací*

Proto je abstraktní syntax vždy jednoznačná.

Ale je často zavedena gramatikou, kterou když čteme jako gramatiku konkrétní syntaxe, je tato konkrétní gramatika nejednoznačná. V bezkontextových jazycích se však tato nejednoznačnost týká pouze struktury vět jazyka a lze ji obejít například vhodným uzávorkováním.

Typy

## Pojetí typů

- množiny hodnot
- heterogenní algebry (množiny hodnot spolu s operacemi na nich) algebraické typy
- variety heterogenních algeber (množiny s operacemi a axiomy) ADT

## Příklad: Typ zásobník nad celými čísly

1. Zásobníky jsou pevným způsobem reprezentovány, například pomocí pole a indexu vrcholu zásobníku. Typ Zásobník má význam *množiny* všech takových dat (polí konkrétních hodnot + indexů).

Nad zásobníky lze definovat externí operace závislé na reprezentaci.

2. Typ Zásobník má význam množiny všech *heterogenních univerzálních algeber* se signaturou

**Sorty:** Zásobník, Číslo, Boolean

**Operace:**

*prázdný* : Zásobník

*jeprázdný* : Zásobník  $\rightarrow$  Boolean

*push* : Zásobník  $\times$  Číslo  $\rightarrow$  Zásobník

*pop* : Zásobník  $\rightarrow$  Zásobník

*top* : Zásobník  $\rightarrow$  Číslo

3. Typ Zásobník má význam *variety* všech heterogenních univerzálních algeber, která je určena teorií

**Sorty**

**Operace**

**Axiomy:**

$$jeprázdný(prázdný) = True$$

$$jeprázdný(push(z, n)) = False$$

$$pop(push(z, n)) = z$$

$$top(push(z, n)) = n$$



# Typy a typové konstruktory

## Základní (primitivní, atomické)

*skalární*

- logické hodnoty
- znaky (krátké, dlouhé)
- čísla (celá, desetinná, ...)
- adresy
- $\vdots$

## Složené

- kartézský součin
- disjunktí sjednocení
- zobrazení (pole, funkce)

*součinné*

*součtové*

*mocninné*

## Kartézský součin

$$A \times B$$

Množina všech uspořádaných dvojic  $(a, b)$  takových, že  $a : A, b : B$ .

Funkcím

$$\text{fst} : A \times B \rightarrow A$$

$$\text{fst} (x, y) = x$$

$$\text{snd} : A \times B \rightarrow B$$

$$\text{snd} (x, y) = y$$

říkáme *projekční funkce* nebo *selektory* hodnot ze součinnového typu  $A \times B$ .

Je-li  $z = (x, y) : A \times B$ , pak  $x = \text{fst } z, y = \text{snd } z$ .

$$A \times B \times C$$

Podobně pro kartézský součin tří a více typů.

## Agregáty

V typu agregátu jsou definovány projekční funkce, často se zvláštní postfixovou syntaxí.  
Je-li

$$\text{Datum} = \{den : \text{Int}, mesic : \text{String}, rok : \text{Int}\}$$

$$d : \text{Datum}$$

$$d = \{den = 5, mesic = \text{"říjen"}, rok = 2005\}$$

pak selektory *den*, *mesic* a *rok* mají typy

$$den : \text{Datum} \rightarrow \text{Int}, \quad mesic : \text{Datum} \rightarrow \text{String}, \quad rok : \text{Datum} \rightarrow \text{Int}$$

a zápis  $d.den = 5$  znamená  $den(d) = 5$ .

Často syntax jazyka vyžaduje, aby bylo jednoznačně řečeno, *kterého* typu agregátu je daná hodnota:

$$d = \text{Datum}\{den = 5, mesic = \text{"říjen"}, rok = 2005\}$$

## Disjunktní sjednocení

### $A + B$

Sjednocení množiny všech dvojic  $(L, a)$  s množinou všech dvojic  $(R, b)$ , kde  $a : A$ ,  $b : B$ .  $L, R$  jsou příznaky původu prvku  $a$ , resp.  $b$ .

Funkcím

$$inl : A \rightarrow A + B$$

$$inl\ x = (L, x)$$

$$inr : B \rightarrow A + B$$

$$inr\ y = (R, y)$$

říkáme *inserční funkce* nebo *konstruktory* hodnot do součtového typu  $A + B$ .

Je-li  $x : A$ ,  $y : B$ ,  $u = (L, x)$ ,  $v = (R, y)$ , pak  $u = inl\ x$ ,  $v = inr\ y$ .

### $A + B + C$

Podobně pro disjunktní sjednocení tří a více typů.

## Uniony

V typu unionu jsou definovány inverze konstruktorů, často se zvláštní postfixovou syntaxí. Je-li

$$\text{Cislo} = \{ \text{cele} : \text{Int} \mid \text{desetinne} : \text{Float} \}$$

$$c : \text{Cislo}$$

$$c = \{ \text{cele} = 42 \}$$

pak konstruktory *cele* a *desetinne* mají typy

$$\text{cele} : \text{Int} \rightarrow \text{Cislo}, \quad \text{desetinne} : \text{Float} \rightarrow \text{Cislo}$$

a zápis  $c.\text{cele} = 42$  znamená  $\text{cele}^{-1}(c) = 42$ .

Někdy se vyžaduje, aby bylo jednoznačně řečeno, *kterého* typu unionu je daná hodnota:

$$c = \text{Cislo} \{ \text{cele} = 42 \}$$

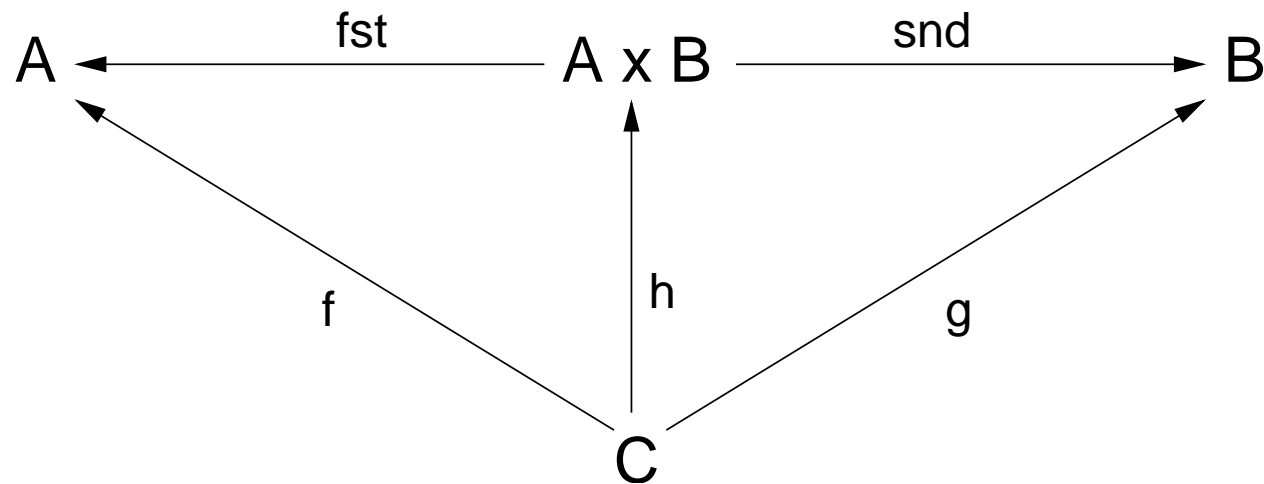
## Obečné vlastnosti kartézského součinu a disjunktčního sjednocení

Nechť  $A, B, C$  jsou typy,  $f : C \rightarrow A$ ,  $g : C \rightarrow B$  nějaké dvě funkce.

Pak existuje jediná funkce  $h : C \rightarrow A \times B$  tak, že

$$\text{fst} \circ h = f, \quad \text{snd} \circ h = g$$

Tato funkce  $h$  se obvykle značí  $\langle f, g \rangle$  nebo  $f \Delta g$ .

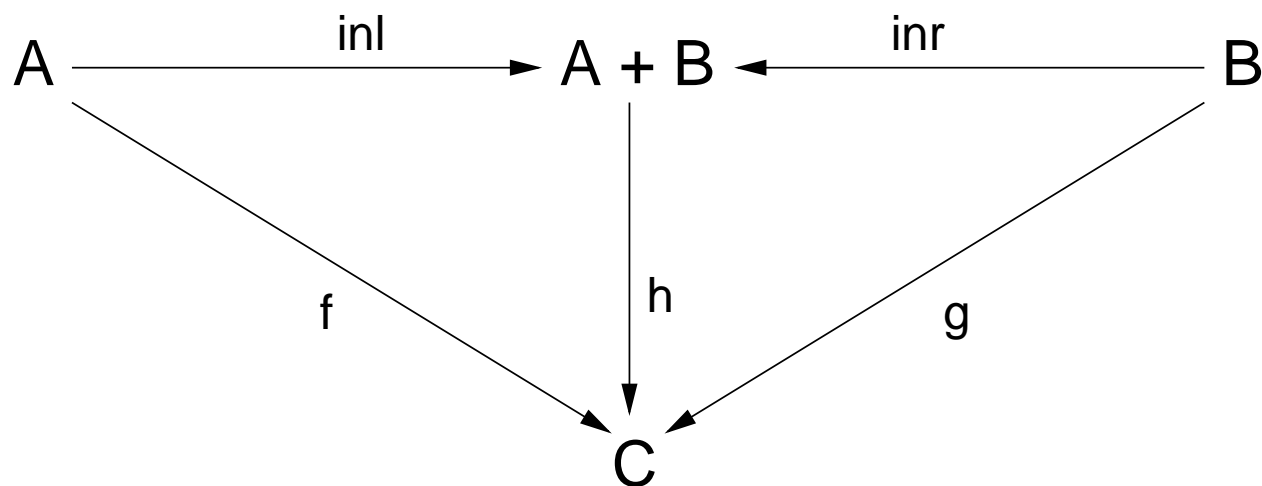


Součin typů je nejobecnější typ, z něž vedou morfismy (projekční funkce) do činitelských typů.

Nechť  $A, B, C$  jsou typy,  $f : A \rightarrow C$ ,  $g : B \rightarrow C$  nějaké dvě funkce.  
Pak existuje jediná funkce  $h : A + B \rightarrow C$  tak, že

$$h \circ \text{inl} = f, \quad h \circ \text{inr} = g$$

Tato funkce  $h$  se obvykle značí  $[f, g]$  nebo  $f \nabla g$ .



Součet typů je nejméně omezující typ, do nějž vedou morfismy (konstruktory) ze sčítancových typů.



## Pole

Zobrazení (konečného) ordinálního typu  $I$  do typu  $T$ .

(Konečný typ  $I$  je ordinální  $\Leftrightarrow$  existuje bijekce  $ord : I \rightarrow \{1, \dots, n\}$ , kde  $n = |I|$ .)

Zápis: `Array  $I$   $T$`

## Vícerozměrná pole

$$p = \begin{matrix} & \overbrace{\hspace{4cm}}^J \\ I \left\{ \begin{array}{cccc} 11 & 12 & 13 & 14 \\ 21 & 22 & 23 & 24 \end{array} \right. \end{matrix} \quad \text{Array } (I \times J) \ T$$

$$q = \begin{matrix} & \overbrace{\hspace{4cm}}^J \\ I \left\{ \begin{array}{cccc} 11 & 12 & 13 & 14 \\ & \overbrace{\hspace{4cm}}^J \\ 21 & 22 & 23 & 24 \end{array} \right. \end{matrix} \quad \text{Array } I \ (\text{Array } J \ T)$$

$$p[i, j] \cong q[i][j]$$

# Funkce

Zobrazení typu  $A$  do typu  $B$ .

Zápis:  $A \rightarrow B$

Funkce více proměnných (větší arity)

$$f = \left( \begin{array}{cccc} (1, 1) \mapsto 11 & (1, 2) \mapsto 12 & (1, 3) \mapsto 13 & (1, 4) \mapsto 14 \\ (2, 1) \mapsto 21 & (2, 2) \mapsto 22 & (2, 3) \mapsto 23 & (2, 4) \mapsto 24 \end{array} \right) \quad A \times B \rightarrow C$$

$$g = \left( \begin{array}{ccccc} 1 \mapsto & (1 \mapsto 11 & 2 \mapsto 12 & 3 \mapsto 13 & 4 \mapsto 14) \\ 2 \mapsto & (1 \mapsto 21 & 2 \mapsto 22 & 3 \mapsto 23 & 4 \mapsto 24) \end{array} \right) \quad A \rightarrow (B \rightarrow C)$$

$$f(x, y) \cong g \ x \ y$$

## Potenční množiny

Mocninný typ, speciální případ zobrazení.

$\text{Set } A$       typ všech podmnožin  $A$

$A \rightarrow \text{Bool}$    typ všech predikátů nad  $A$

Každé hodnotě  $a : \text{Set } A$  odpovídá tzv. *charakteristická funkce*  $\chi_a : A \rightarrow \text{Bool}$  taková, že pro každé  $x : A$  platí  $x \in a \Leftrightarrow \chi_a(x) = \text{true}$ .

## Prázdný typ

Void,  $\perp$ , iniciální typ

(disjunktní sjednocení nulového počtu typů)

Neobsahuje žádnou hodnotu.

## Jednotkový typ

Unit,  $\top$ , finální typ

(kartézský součin nulového počtu typů)

Má jedinou hodnotu – uspořádanou nultici  $()$ .

## Výčtové typy

Zvláštní případ disjunktčního sjednocení, kdy všechny inserce jsou typu  $\text{Unit} \rightarrow T$ .

$$\text{Bool} = \{ \textit{false} : \text{Unit} \mid \textit{true} : \text{Unit} \}$$

$$\text{Tyden} = \{ \textit{po} : \text{Unit} \mid \textit{út} : \text{Unit} \mid \dots \mid \textit{ne} : \text{Unit} \}$$

$$\{ \textit{false} = () \}, \{ \textit{true} = () \}, \{ \textit{po} = () \}, \dots$$

zkracujeme na

$$\text{Bool} = \textit{false} \mid \textit{true}$$

$$\text{Tyden} = \textit{po} \mid \textit{út} \mid \textit{st} \mid \textit{čt} \mid \textit{pá} \mid \textit{so} \mid \textit{ne}$$

$$\textit{false}, \textit{true}, \textit{po}, \dots$$

## Rekursivní (induktivní) typy

Je-li  $F(t)$  zápis typů („typový výraz“) obsahující typovou proměnnou  $t$ , pak

$$\mu t. F(t)$$

je (množinově) *nejmenší* typ vyhovující rovnici / isomorfismu

$$t = F(t)$$

Definice typu  $T = \mu t. F(t)$  se často zapisuje stručněji

$$T = F(T)$$

a hovoří se o tzv. *rekursivní definici* typu.

## Příklad: přirozená čísla

$$\text{Nat} = \mu n. \{ nula : \text{Unit} \mid naslednik : n \}$$

tj.

$$\text{Nat} = \{ nula : \text{Unit} \mid naslednik : \text{Nat} \}$$

je typ s hodnotami

$$\{ nula = () \}$$

$$\{ naslednik = \{ nula = () \} \}$$

$$\{ naslednik = \{ naslednik = \{ nula = () \} \} \}$$

$\vdots$



## Příklad: konečné seznamy

Je-li  $T$  nějaký typ, pak typ  $\mu l. \{nil : \text{Unit} \mid cons : T \times l\}$  označujeme  $T^*$  a nazýváme typem všech (konečných) seznamů nad  $T$ .

Pro  $a_1, a_2, a_3, \dots$  typu  $T$  píšeme

$$[] = \{nil = ()\}$$

$$[a_1] = \{cons = (a_1, \{nil = ()\})\}$$

$$[a_1, a_2] = \{cons = (a_1, \{cons = (a_2, \{nil = ()\})\})\}$$

$$\vdots$$

## Korekursivní (koinduktivní) typy

Je-li  $F(t)$  zápis typů („typový výraz“) obsahující typovou proměnnou  $t$ , pak

$$\nu t. F(t)$$

je (množinově) *největší* typ vyhovující rovnici / isomorfismu

$$t = F(t)$$

Definice typu  $T = \nu t. F(t)$  se často zapisuje stručněji

$$T = F(T)$$

a hovoří se o tzv. *korekursivní definici* typu.

### Příklad: nekonečné posloupnosti („proudy“)

Je-li  $T$  nějaký typ, pak typ  $\nu l. T \times l$  označujeme  $T^\omega$  a nazýváme typem všech nekonečných posloupností nad  $T$ .

# Monomorfismus a polymorfismus

## Monomorfní typy

jsou buď základní typy, anebo jsou (pomocí typových konstruktorů) složené z monomorfních typů.

## Polymorfní typy

zastupují celou množinu monomorfních typů.

**Parametrický polymorfismus** – v typových výrazech se vyskytují typové proměnné, za něž lze dosadit libovolný typ.

**Podtypový (inklusní) polymorfismus** – v typovém systému se zavede mezi typy relace  $\leq$ : a každá hodnota má kromě svého nejmenšího typu i všechny jeho nadtypy.

## Parametrický polymorfismus

Typ je parametricky polymorfní, zastupuje-li celou množinu monomorfních typů. Tato množina je generována náhradou typových proměnných všemi monomorfními typy (v typovém výrazu reprezentujícím polymorfní typ). Parametricky polymorfní typ je vyjádřen typovým výrazem se základními typy, typovými konstruktory a universálně kvantifikovanými typovými proměnnými.

Příklady:

$$\forall b. \text{Array } (0..9) \ b$$
$$\forall a. a \rightarrow \text{Bool}$$
$$\forall a \forall b \forall c. \{ a_{sel} : a, b_{sel} : b, c_{sel} : c \}$$

Typ  $T'$  vzniklý z parametricky polymorfního typu  $T$  náhradou za nějakou jeho typovou proměnnou se nazývá *odvozený* z  $T$ . Říkáme pak, že  $T$  je *obecnější* než  $T'$ .

*Hlavní typ* hodnoty  $v$  je její nejobecnější typ, z něhož lze odvodit pouze typy, které jsou v souladu s definicí hodnoty  $v$ .

Příklady:

$$fst(x, y) = x \quad fst : \forall a \forall b. a \times b \rightarrow a$$

$$id(x) = x \quad id : \forall a. a \rightarrow a$$

Množina hodnot typu  $T$  (tj. množina těch hodnot, jichž je  $T$  hlavním typem) je rovna průniku množin hodnot všech monomorfních typů odvozených z  $T$ .

$$a \rightarrow a \quad \{id\}$$

$$a \rightarrow b \rightarrow a \quad \{const\}$$

$$(a, b) \rightarrow b \quad \{snd\}$$

$$[a] \quad \{[]\}$$

Polymorfní typové systémy {  
Girardův-Reynoldsův s polymorfismem obecného ranku  
Hindleyho-Milnerův s polymorfismem prvního ranku

*Otypování* výrazu je nalezení jeho (hlavního) typu. V monomorfních typových systémech je triviální.

Otypování v parametricky polymorfních typových systémech je založeno na unifikaci typových výrazů. Pro složitější typové systémy je obecně nerozhodnutelné.



## Typové systémy s podtypy

Na množině typů je zavedeno uspořádání  $\leqslant$  .

Zápis  $A \leqslant B$  čteme „ $A$  je *podtypem* typu  $B$ “.

Je-li  $A \leqslant B$ , pak v kontextu, ve kterém se očekává hodnota typu  $B$ , můžeme bezpečně použít hodnotu podtypu  $A$ .

### Pravidlo subsumpce

Nechť  $A, B$  jsou typy takové, že  $A \leqslant B$ , a necht'  $a$  je hodnota typu  $A$ .

Potom také  $a$  je typu  $B$ .

Pravidlo subsumpce se zapisuje ve tvaru

$$\frac{a : A \quad A \leqslant B}{a : B}$$

## Kovariance a kontravariance

Typový konstruktor  $S$  je *kovariantní*, když

$$\frac{A \leqslant A'}{S A \leqslant S A'}$$

**Příklad:** Typový konstruktor `Set` je kovariantní:

$$\sigma \leqslant \sigma' \Rightarrow \text{Set } \sigma \leqslant \text{Set } \sigma'$$

Přirozené číslo je celým číslem, tedy i množina přirozených čísel je množinou celých čísel.

Typový konstruktor  $T$  je *kontravariantní*, když

$$\frac{A \leqslant A'}{T A' \leqslant T A}$$

**Příklad:** Typový konstruktor Predicate,  $\text{Predicate } \alpha = \alpha \rightarrow \text{Bool}$ , je kontravariantní:

$$\sigma \leqslant \sigma' \Rightarrow \text{Predicate } \sigma' \leqslant \text{Predicate } \sigma$$

Přirozené číslo je celým číslem, tedy predikát nad celými čísly je predikátem nad přirozenými čísly.

Není-li typový konstruktor (v daném typovém parametru) kovariantní ani kontravariantní, říkáme někdy, že je (v tomto parametru) *invariantní*.

U typových konstruktorů větší arity (binárních, ternárních...) se kovariance a kontravariance zavádí zvlášť pro každý typový parametr.

$n$ -ární typový konstruktor  $S$  je ve svém  $i$ -tém typovém parametru ( $1 \leq i \leq n$ ) *kovariantní*, když

$$\frac{A_i \leqslant A'}{S A_1 \dots A_n \leqslant S A_1 \dots A_{i-1} A' A_{i+1} \dots A_n}$$

$n$ -ární typový konstruktor  $T$  je ve svém  $i$ -tém typovém parametru ( $1 \leq i \leq n$ ) *kontravariantní*, když

$$\frac{A_i \leqslant A'}{T A_1 \dots A_{i-1} A' A_{i+1} \dots A_n \leqslant T A_1 \dots A_n}$$

**Příklad:** Typový konstruktor  $\rightarrow$  je v prvním parametru kontravariantní a ve druhém parametru kovariantní:

$$\begin{aligned}\sigma \leqslant: \sigma' &\Rightarrow \sigma' \rightarrow \tau \leqslant: \sigma \rightarrow \tau \\ \tau \leqslant: \tau' &\Rightarrow \sigma \rightarrow \tau \leqslant: \sigma \rightarrow \tau'\end{aligned}$$

Z kovariance druhého typového parametru a pravidla subsumpce vyplývá, že každou funkci typu  $\sigma \rightarrow \tau$  lze považovat i za funkci nadtypu  $\sigma \rightarrow \tau'$ . Tedy volání  $f(a)$ , které vrací hodnotu typu  $\tau$ , se může objevit v kontextu, kde se očekává hodnota nadtypu  $\tau'$ .

Z kontravariance prvního typového parametru a pravidla subsumpce vyplývá, že každou funkci typu  $\sigma' \rightarrow \tau$  lze považovat i za funkci nadtypu  $\sigma \rightarrow \tau$ . Tedy očekává-li funkce  $f$  argument typu  $\sigma'$ , lze ji aplikovat na argument jeho podtypu  $\sigma$ .

**Využití:** zejména v typovaných systémech pro objektově orientované jazyky.

**Nevýhoda:** nerozhodnutelnost otypování  $\Rightarrow$  nutné dynamické typové kontroly.

## Podtypový polymorfismus

Též *inkluzní polymorfismus*. Je důsledkem subsumpčního principu, tj. pravidla

$$A \leqslant B, a : A \Rightarrow a : B.$$

Totíž je-li  $a : A$ , pak typem hodnoty  $a$  je i každý nadtyp typu  $A$ .

## Příklad:

$$\text{Bod} = \{x : \text{Real}; y : \text{Real}\}$$

$$\text{BarevnyBod} = \{x : \text{Real}; y : \text{Real}, c : \text{Barva}\}$$

$$\text{BarevnyBod} \leqslant: \text{Bod}$$

$$\text{presun} : \text{Bod} \rightarrow \text{Bod}$$

$$\text{presun} \{x = p; y = q\} = \{x = p + 1; y = q + 1\}$$

$$\text{zmodrej} : \text{Bod} \rightarrow \text{BarevnyBod}$$

$$\text{zmodrej} \{x = p; y = q\} = \{x = p; y = q; c = \text{modra}\}$$

Potom také

$$\{x = 2; y = 3; c = \text{zelena}\} : \text{Bod}$$

$$\text{presun} : \text{BarevnyBod} \rightarrow \text{Bod}$$

$$\text{zmodrej} : \text{BarevnyBod} \rightarrow \text{BarevnyBod}$$

$$\text{zmodrej} : \text{Bod} \rightarrow \text{Bod}$$

$$\text{zmodrej} : \text{BarevnyBod} \rightarrow \text{Bod}$$



## Přetížení

Symbol je přetížený, označuje-li více hodnot různých typů. Obvykle je každá z těchto hodnot definována různě.

Jednodušší jazyky mají přetížené jen zabudované operátory, jazyky s bohatšími typovými systémy řeší přetížení systematicky a umožňují definovat nová jména přetížená více hodnotami.

Při překladu nebo interpretaci je nutno přetížené symboly takzvaně *vyřešit* – obdařit sémantikou *jediné* z hodnot, jež ho přetěžují. V konkrétním výrazu se pozná, která z těchto hodnot to bude (například z počtu argumentů přetížené funkce a z jejich typů).

U funkcí a procedur se též rozlišuje *kontextově nezávislé* a *kontextově závislé* přetížení. Kontextově nezávisle přetížené funkce a procedury lze vyřešit jen z typů argumentů. U kontextově závisle přetížených funkcí (procedur) typy argumentů nestačí a je nutno vzít do úvahy širší kontext.

Nechť symbol  $g$  je přetížen dvěma různými typy  $\sigma_1 \rightarrow \tau_1$ ,  $\sigma_2 \rightarrow \tau_2$ .

- Při kontextově nezávislém přetížení (Pascal, Haskell, ML) je  $\sigma_1 \neq \sigma_2$ .
- Při kontextově závislém přetížení (Ada) je  $\sigma_1 = \sigma_2$ , ale  $\tau_1 \neq \tau_2$ .

Nelze je vždy jednoznačně vyřešit. Jazyk musí nejednoznačné výrazy zakazovat.

## Příklad přetížení

Nechť operátor  $(/)$  je přetížen třemi typy:

$$(\textcolor{green}{/}) : \text{Int} \times \text{Int} \rightarrow \text{Int}$$
$$(\textcolor{red}{/}) : \text{Float} \times \text{Float} \rightarrow \text{Float}$$
$$(\textcolor{blue}{/}) : \text{Int} \times \text{Int} \rightarrow \text{Float}$$

Přetížení je kontextově závislé. Nechť  $x : \text{Float}$ ,  $n : \text{Int}$  a nechť  $(=)$  je (rovněž přetížený) operátor rovnosti vyžadující, aby obě strany rovnosti byly stejného typu.

$x = 7.0/2.0$	$\Rightarrow$	$x = 7.0\textcolor{red}{/}2.0$
$x = 7/2$	$\Rightarrow$	$x = 7\textcolor{blue}{/}2$
$n = 7/2$	$\Rightarrow$	$n = 7\textcolor{green}{/}2$
$n = (7/2)/(5/2)$	$\Rightarrow$	$n = (\textcolor{green}{7}\textcolor{green}{/}2)\textcolor{green}{/}(\textcolor{green}{5}\textcolor{green}{/}2)$
$x = (7/2)/(5/2)$	$\Rightarrow$	$x = (\textcolor{blue}{7}\textcolor{blue}{/}2)\textcolor{red}{/}(\textcolor{blue}{5}\textcolor{blue}{/}2)$
	nebo	$x = (\textcolor{green}{7}\textcolor{green}{/}2)\textcolor{blue}{/}(\textcolor{green}{5}\textcolor{green}{/}2)$

Poslední výraz je nejednoznačný, přetížení nelze vyřešit.

## Koerce

Koerce je implicitní zobrazení hodnot jednoho typu do hodnot jiného typu.

$\text{Int} \rightarrow \text{Float}$ ,  $\text{Float} \rightarrow \text{Double}$ ,  $\text{Float} \rightarrow \text{Complex}$  (widening)

$a \rightarrow (a \mid b)$  (unioning)

$a \rightarrow ()$  (forgetting)

$a \rightarrow \text{Array } i \ a$  (rowing, autoboxing)

$\text{Ref } a \rightarrow a$  (dereferencing)

Jazyky, které jsou polymorfní nebo systematicky řeší přetížení, implicitní koerce nepoužívají a přetypování v nich musí být explicitní (implicitní koerce interferuje s přetížením a polymorfismem).

# Druhy

Typy v programovacích jazycích slouží ke klasifikaci hodnot. U jazyků s bohatšími typovými systémy *druhy* slouží ke klasifikaci typů, typových konstruktorů, typových funkcí apod.

Symbol  $*$  značí druh všech typů.

$\text{Bool} : *$

$\text{Int} \rightarrow \text{Char} : *$

$\forall a. \text{List } a : *$

Lze pracovat i s druhem unárních typových konstruktorů

$\text{List} : * \rightarrow *$

funkcí z (unárních) typových funkcí do typů

$(* \rightarrow *) \rightarrow *$

nebo funkcí z hodnot do typů

$\text{Vec} : \text{Nat} \rightarrow *$

## Hodnotově závislé typy

Bohatší typové systémy mohou pracovat s typy závislými na hodnotách. Typové konstruktory mohou být parametrizovány nejen typy, ale i hodnotami.

## Příklad – skalární součin

V jazycích bez závislých typů lze test na rovnost délek násobených vektorů buď neprovádět vůbec

$$dp [] [] = 0.0$$

$$dp\ s\ t = head\ s * head\ t + dp\ (tail\ s)\ (tail\ t)$$

anebo ho posunout do doby běhu.

V jazycích se závislými typy lze korektnost zaručit staticky tím, že informaci o délce vektoru zahrneme do jeho typu  $Vec\ n$  všech  $n$ -složkových vektorů reálných čísel.

$$Vec : Nat \rightarrow *$$

$$vhead : \forall n : Nat. Vec\ (n + 1) \rightarrow Float$$

$$vtail : \forall n : Nat. Vec\ (n + 1) \rightarrow Vec\ n$$

$$dp : \forall n : Nat. Vec\ n \rightarrow Vec\ n \rightarrow Float$$

$$dp [] [] = 0.0$$

$$dp\ s\ t = vhead\ s * vhead\ t + dp\ (vtail\ s)\ (vtail\ t)$$

## Příklad – typ funkce *printf*

$\text{Printf} : \text{String} \rightarrow *$

$\text{Printf} (\text{"\%d"} ++ t) = \text{Int} \rightarrow \text{Printf } t$

$\text{Printf} (\text{"\%s"} ++ t) = \text{String} \rightarrow \text{Printf } t$

$\text{Printf } t = \text{Printf } t'$  ,                      nezačíná-li  $t$  znakem % a  $t'$  je zbytek

$\text{Printf} "" = \text{String}$

$\text{printf} : (t : \text{String}) \rightarrow \text{Printf } t$

$\text{printf } t = \text{pr } t "",$       kde    $\text{pr} "" v = v$   
    $\text{pr} (\text{"\%d"} ++ t) v = \lambda(i:\text{Int}) \mapsto \text{pr } t (v ++ \text{show } i)$   
    $\text{pr} (\text{"\%s"} ++ t) v = \lambda(s:\text{String}) \mapsto \text{pr } t (v ++ s)$   
    $\text{pr} (u ++ t) v = \text{pr } t (v ++ u)$  ,      jinak

$\text{printf} "ab" : \text{Printf } "ab" = \text{String}$

$\text{printf} "\%s=\%d" : \text{Printf } "\%s=\%d" = \text{String} \rightarrow \text{Int} \rightarrow \text{String}$



## Výhody hodnotově závislých typů

Mnoho vlastností lze závislými typy vyjádřit jemněji a přesněji. Například

*appendvec* :  $\forall m \forall n. \text{Vec } m \rightarrow \text{Vec } n \rightarrow \text{Vec } (m + n)$ .

Pomocí typů lze vyjádřit sémantiku. Potom otypování = důkaz korektnosti.

## Nevýhody

Otypování je v obecném případě (za přítomnosti netriviálních rekursivních typů) *nerozhodnutelné*.

## Jazyky

Vesměs akademické jazyky:

Agda, Cayenne, Dependent ML, Russell, Epigram, Coq ...

# Sémantika

Axiomatická sémantika

Operační sémantika

Denotační sémantika

Sémantika (*σημαντικός*) přiřazuje významy programům nebo jejich částem.

Sémantiku programovacího jazyka lze zadat

- Neformálně – popisem v přirozeném jazyce. To může být nepřesné, často je popis neúplný, nejednoznačný.
- Prohlášením jedné implementace kompilátoru za standard. Sice jednoznačné, ale případné chyby v kompilátoru se tak stávají součástí definice jazyka.
- Formálně, pomocí matematického zápisu.

## Formální sémantika

**Denotační sémantika** je definovaná na programech a jejich komponentách explicitně (jako množina funkcí přiřazujících částem programů význam).

**Operační sémantika** se zavádí množinou pravidel popisujících výpočet abstraktního počítače. Výsledek tohoto výpočtu je významem programu.

Rozlišujeme *strukturní* (sos) a *přirozenou* (bos) operační sémantiku.

**Axiomatická sémantika** je dána jako množina tvrzení (tzv. teorie) o nějakém systému, v němž probíhá výpočet. Používá se zejména u imperativních jazyků, protože tvrzení se vyjadřují o stavech.

## Denotační sémantika – příklad

$P$	množina programových konstrukcí (v abstraktní syntaxi)
$MVar$	množina programových (přepisovatelných) proměnných
$V$	množina hodnot
$S = MVar \longrightarrow V$	množina stavů
$\mathcal{M}[\_]\_ : P \times S \longrightarrow V$	významová funkce
$[\_]\_ : P \times S \longrightarrow S$	stavový transformátor

$$\mathcal{M}[x ++]\sigma = \sigma(x) \qquad \mathcal{M}[++ x]\sigma = \sigma'(x)$$

$$[x ++]\sigma = \sigma' \qquad [++ x]\sigma = \sigma'$$

$$\text{kde } \sigma'(x) = \sigma(x) + 1, \quad \forall y, y \neq x. \sigma'(y) = \sigma(y)$$

## Strukturní operační sémantika – příklad

*Relace „krok výpočtu“*  $\rightsquigarrow \subseteq (P \times S) \times (P \times S)$  je zadána množinou pravidel.

$$\frac{\langle e, \sigma \rangle \rightsquigarrow \langle tt, \sigma' \rangle}{\langle \text{if } e \text{ then } p \text{ else } q, \sigma \rangle \rightsquigarrow \langle p, \sigma' \rangle}$$

$$\frac{\langle e, \sigma \rangle \rightsquigarrow \langle ff, \sigma' \rangle}{\langle \text{if } e \text{ then } p \text{ else } q, \sigma \rangle \rightsquigarrow \langle q, \sigma' \rangle}$$

$$\frac{\langle e, \sigma \rangle \rightsquigarrow \langle e', \sigma' \rangle}{\langle \text{if } e \text{ then } p \text{ else } q, \sigma \rangle \rightsquigarrow \langle \text{if } e' \text{ then } p \text{ else } q, \sigma' \rangle}$$

## Přirozená operační sémantika – příklad

*Relace „výpočet“*  $\rightsquigarrow \subseteq (P \times S) \times (P \times S)$  je zadána množinou pravidel.

$$\frac{\langle e, \sigma \rangle \rightsquigarrow \langle tt, \sigma' \rangle \quad \langle p, \sigma' \rangle \rightsquigarrow \langle p', \sigma'' \rangle}{\langle \text{if } e \text{ then } p \text{ else } q, \sigma \rangle \rightsquigarrow \langle p', \sigma'' \rangle}$$

$$\frac{\langle e, \sigma \rangle \rightsquigarrow \langle ff, \sigma' \rangle \quad \langle q, \sigma' \rangle \rightsquigarrow \langle q', \sigma'' \rangle}{\langle \text{if } e \text{ then } p \text{ else } q, \sigma \rangle \rightsquigarrow \langle q', \sigma'' \rangle}$$

## Axiomatická sémantika – příklad

*Sekvent* v Hoarově logice je trojice tvaru  $\{A\} p \{B\}$ , kde  $A$  je tzv. *vstupní podmínka*,  $B$  je *výstupní podmínka* a  $p$  je příkaz. Množina *odvoditelných sekventů* je zadána odvozovacími pravidly a axiomy.

$$\frac{}{\{[e/\xi]A\} \ x := e \ \{[!x/\xi]A\}}$$

$$\frac{\{A\} p \{B\}, \quad B \Rightarrow C, \quad \{C\} q \{D\}}{\{A\} \text{ **begin** } p ; q \text{ **end** } \{D\}}$$

$$\frac{\{A \wedge e\} p \{A\}}{\{A\} \text{ **while** } e \text{ **do** } p \{A \wedge \neg e\}}$$

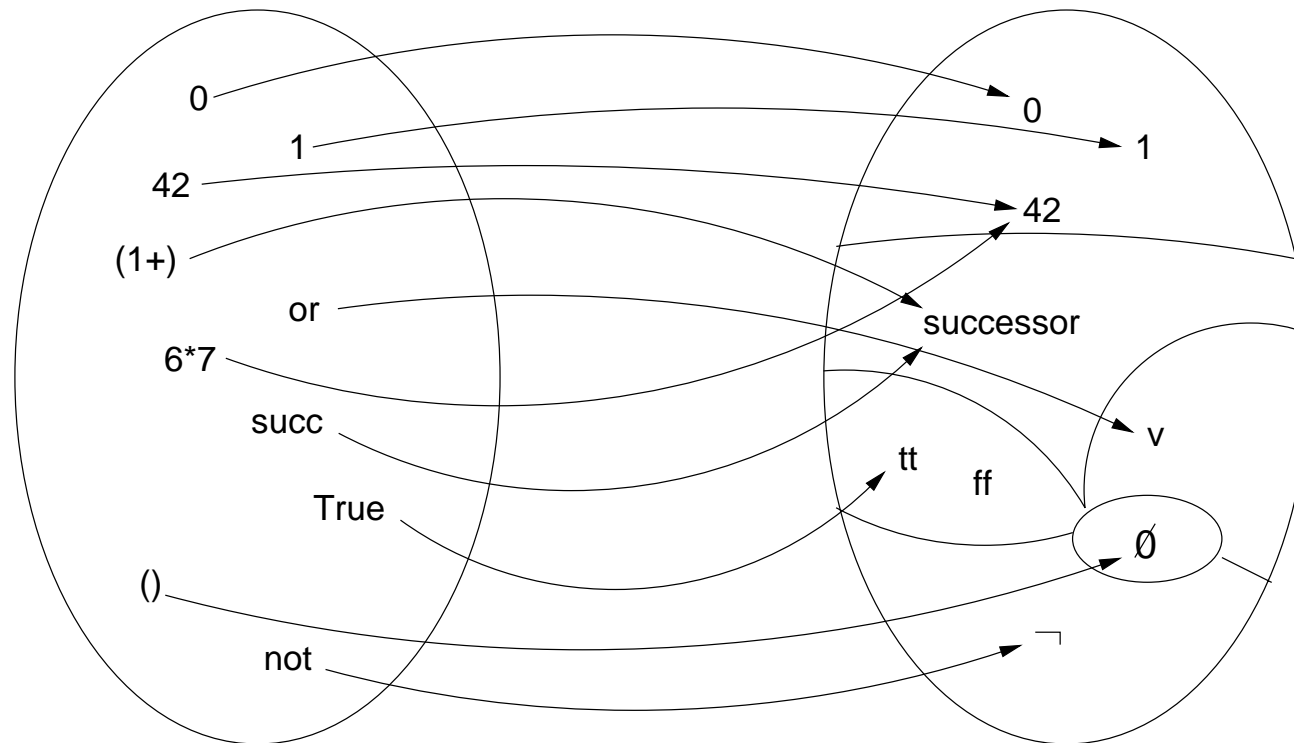


# Denotační sémantika

## Přiřazení prvků sémantických domén programovým konstrukcím

Syntaktické entity:  
termy (a jejich  
konstruktory)  
z abstraktní  
syntaxe

Sémantické entity:  
prvky sémantických  
domén



## Nedeterministická sémantika

Příkazy určují nedeterministické stavové transformátory:

$$s : S \rightarrow \mathcal{P}(S)$$

Sekvence

$$\llbracket \mathbf{begin\ end} \rrbracket \sigma = \llbracket \mathbf{skip} \rrbracket \sigma = \{\sigma\}$$

$$\llbracket \mathbf{begin\ } p_1; \dots; p_k \mathbf{\ end} \rrbracket \sigma = \bigcup_{\tau \in \llbracket p_1 \rrbracket \sigma} \llbracket \mathbf{begin\ } p_2; \dots; p_k \mathbf{\ end} \rrbracket \tau$$

pro  $k \geq 1$

Nedeterministický výběr

$$\llbracket \mathbf{begin} \ p_1 \mid \dots \mid p_k \ \mathbf{end} \rrbracket \sigma = \bigcup_{i=1}^k \llbracket p_i \rrbracket \sigma$$

Paralelní kompozice

$$\llbracket \mathbf{begin} \ p_1 \parallel \dots \parallel p_k \ \mathbf{end} \rrbracket \sigma = \bigcup_{\iota \text{ permutace}} \llbracket \mathbf{begin} \ p_{\iota(1)}; \dots; p_{\iota(k)} \ \mathbf{end} \rrbracket \sigma$$

pro atomické  $p_1, \dots, p_k$

## Deterministická sémantika

Významem výrazu  $e$  je jeho hodnota (prvek sémantické domény).

V imperativních jazycích závisí sémantika výrazu na *stavu*  $\sigma \in S$ , takže

$$\mathcal{M}[[e]] : S \longrightarrow Val$$

Význam výrazu  $e$  ve stavu  $\sigma$  je hodnota  $\mathcal{M}[[e]]\sigma \in Val$ .

V jazycích bez vedlejších efektů, ale s (čistými) proměnnými závisí sémantika výrazu na tzv. *hodnotovém kontextu*  $\varepsilon \in Env$ . Potom

$$\mathcal{M}[[e]] : Env \longrightarrow Val$$

Význam výrazu  $e$  v hodnotovém kontextu  $\varepsilon$  je hodnota  $\mathcal{M}[[e]]\varepsilon \in Val$ .

Sémantika výrazů se definuje pomocí sémantiky podvýrazů.

**Příklad:**

$$\mathcal{M}[[0]]\sigma = 0$$

$$\mathcal{M}[[1]]\sigma = 1$$

$$\vdots$$

$$\mathcal{M}[[e_1 + e_2]]\sigma = \mathcal{M}[[e_1]]\sigma + \mathcal{M}[[e_2]]\sigma$$

$$\mathcal{M}[[e_1 * e_2]]\sigma = \mathcal{M}[[e_1]]\sigma \cdot \mathcal{M}[[e_2]]\sigma$$

$$\mathcal{M}[[\text{if } e_1 \text{ then } e_2 \text{ else } e_3]]\sigma = \begin{cases} \mathcal{M}[[e_2]]\sigma, & \text{pokud } \mathcal{M}[[e_1]]\sigma = tt \\ \mathcal{M}[[e_3]]\sigma, & \text{pokud } \mathcal{M}[[e_1]]\sigma = ff \\ \perp & \text{jinak} \end{cases}$$

## Výrazy

**Literály** označují hodnoty a obvykle jsou tvořeny jediným lexikálním atomem se zvláštní lexikální syntaxí, například `42`, `1.602e-19`, `0xBE`, `'*'`, `'\n'`.

### Jména

- (pojmenované) konstanty: *pi*, *sin*
- parametry funkcí
- (přepisovatelné) proměnné

**Výrazy** popisující hodnoty **složených typů**

`(1, 'a')`, `{jmeno = "Bob"; adresa = "klobouk"}`

## **Podmíněné výrazy**

**if . . . then . . . else,                      case . . . of . . .**

**Aplikace** funkce na argumenty, tzv. „volání funkce“.

**Abstrakce** („uzávěry“).

**Příkazy** v imperativních jazycích lze považovat za zvláštní druh výrazu (výraz typu Command).

# Funkcionální a procedurální abstrakce

V mnoha jazycích lze funkcionální/procedurální abstrakci použít jen v definicích funkcí/procedur, ale např. v Algolu68 je lze použít i ve výrazech/příkazech a ve funkcionálních jazycích se funkcionální abstrakce (lambda abstrakce) užívají běžně.

Tzv. procedury lze považovat za funkce typu  $t_1 \times \dots \times t_n \rightarrow \text{Command}$ .

Př.:

```
repeat      :  Procedure(Int, Command);
```

```
mezery : Procedure(Int);
```

$$repeat = \mathbf{proc}(n : \text{Int}, p : \text{Command}) \{ \mathbf{from} \ 1 \ \mathbf{to} \ n \ \mathbf{do} \ p \}$$

```
mezery    =    proc( $n : \text{Int}$ ) { if  $n \geq 0$  then repeat( $n$ , write(' '))
                                     else repeat( $-n$ , write(' \0x08')) }
```



*Funkcionální abstrakce* se provádí nad výrazem tím, že některé jeho (volné) proměnné se prohlásí za parametry výsledné funkce. Počet těchto parametrů určuje tzv. *aritu*.

Umožňuje-li jazyk pracovat s funkcemi vyšších řádů, lze všechny funkce (procedury) převést na unární.

Podobně *procedurální abstrakce* se provádí nad příkazem.

ML:        **val** *sqr* = **fn** *x*  $\Rightarrow$  *x* \* *x*

Haskell:   *sqr* = \ *x*  $\rightarrow$  *x* \* *x*

Lisp:        (**define** *sqr* (**lambda** (*x*) (\* *x* *x*)))

Pascal:     **function** *sqr* (*x* : real) : real; **begin** *sqr* := *x* \* *x* **end**

C:           float *sqr* (float *x*) {**return** *x* \* *x*; }

Princip abstrakce lze zobecnit i na jiné syntaktické kategorie, než funkce (např. na typovou abstrakci apod.).

## Proměnné

Rozdílný význam v různých paradigmatech:

**Funkcionální, logické** – *čisté proměnné*, proměnné v matematickém smyslu.

Proměnná označuje hodnotu (třebaže předem neurčenou). Slouží také k označení parametrů funkcí resp. relací.

Haskell:  $fact\ n = \text{if } n == 0 \text{ then } 1 \text{ else } n * fact(n - 1)$

Prolog:  $lessthan(succ(X), succ(Y)) :- lessthan(X, Y).$

## Imperativní – tzv. *přepisovatelné proměnné*.

Proměnná označuje paměťové místo. Teprve toto paměťové místo slouží jako (přechodné) úložiště hodnoty. Hodnota uložená v paměťovém místě se může měnit. Tím se mění stav výpočtu.

Ve většině imperativních jazyků (Pascal, C, Java, ...) se však jménem proměnné označuje i hodnota uložená v odpovídajícím paměťovém místě (automatické dereferencování).

Pascal: **begin** *read*(n); n := n + 1; *write*(n) **end**

Algol68: Ref Int n; n := n + 1

ML: n : int ref; n := !n + 1

Přepisovatelné proměnné složených typů mohou mít tzv. selektivní změny komponent.

$$\text{Datum} = \{r : \text{Int}, m : \text{String}, d : \text{Int}\}$$
$$dnes : \text{Ref Datum}$$
$$dnes := \{r = 2005; m = \text{"ř\u00edjen"}; d = 5\}$$
$$dnes.d := dnes.d + 1$$
$$\approx$$
$$dnes := \{r = (!dnes).r; m = (!dnes).m; d = (!dnes).d + 1\}$$

$\text{Datum}' = \{r : \text{Ref Int}, m : \text{Ref String}, d : \text{Ref Int}\}$

$dnes : \text{Datum}'$

$dnes = \{r = \text{ref } 2005; m = \text{ref "říjen"}; d = \text{ref } 5\}$

$dnes.d := dnes.d + 1$

$\approx$

$dnes.d := !(dnes.d) + 1$

$rdnes : \text{Ref Datum}'$

$rdnes := dnes$

$rdnes.d := rdnes.d + 1$

$\approx$

$(!rdnes).d := !((!rdnes).d) + 1$

## Příkazy

Významem příkazu je *stavový transformátor*  $s : S \longrightarrow S$

$MVar$  množina programových proměnných reprezentujících paměťová místa (i persistentní data)

$Val$  množina hodnot, jež mohou být do těchto míst uloženy

$\sigma : MVar \longrightarrow Val$  stav

$S$  množina všech stavů

Je-li  $p$  příkaz, pak jeho stavový transformátor se značí  $\llbracket p \rrbracket : S \longrightarrow S$ .

## Příkazy obsahující výrazy bez vedlejších efektů

Předpokládejme pro začátek, že pouze příkazy mění stav, výrazy stav nemění.

Prázdný příkaz **skip**

$$\llbracket \mathbf{skip} \rrbracket = id, \quad \llbracket \mathbf{skip} \rrbracket \sigma = \sigma \text{ pro všechny stavy } \sigma \in S$$

Přiřazovací příkaz  $v := e$

$$\llbracket v := e \rrbracket \sigma = \sigma', \quad \text{kde } \sigma'(v) = \mathcal{M}\llbracket e \rrbracket \sigma,$$

$$\forall x \in MVar - \{v\}. \sigma'(x) = \sigma(x)$$

$\mathcal{M}\llbracket e \rrbracket \sigma$  je hodnota výrazu  $e$  ve stavu  $\sigma$



Sekvence **begin**  $p_1; \dots; p_k$  **end**

$$\llbracket \mathbf{begin} \ p_1; \dots; p_k \ \mathbf{end} \rrbracket = \llbracket p_k \rrbracket \circ \dots \circ \llbracket p_1 \rrbracket$$

tj. pro všechna  $\sigma \in S$

$$\llbracket \mathbf{begin} \ p_1; \dots; p_k \ \mathbf{end} \rrbracket \sigma = \llbracket p_k \rrbracket (\llbracket p_{k-1} \rrbracket (\dots (\llbracket p_2 \rrbracket (\llbracket p_1 \rrbracket \sigma)) \dots))$$

Podmíněný příkaz **if**  $e$  **then**  $p_1$  **else**  $p_2$

$$\llbracket \mathbf{if} \ e \ \mathbf{then} \ p_1 \ \mathbf{else} \ p_2 \rrbracket \sigma = \begin{cases} \llbracket p_1 \rrbracket \sigma, & \text{pokud } \mathcal{M} \llbracket e \rrbracket \sigma = tt \\ \llbracket p_2 \rrbracket \sigma, & \text{pokud } \mathcal{M} \llbracket e \rrbracket \sigma = ff \\ \perp & \text{jinak} \end{cases}$$

Příkaz cyklu **while**  $e$  **do**  $p$

$$\llbracket \mathbf{while} \ e \ \mathbf{do} \ p \rrbracket \sigma = \begin{cases} \sigma, & \text{pokud } \mathcal{M}[\llbracket e \rrbracket \sigma] = ff \\ \llbracket \mathbf{while} \ e \ \mathbf{do} \ p \rrbracket (\llbracket p \rrbracket \sigma), & \text{pokud } \mathcal{M}[\llbracket e \rrbracket \sigma] = tt \\ \perp & \text{jinak} \end{cases}$$

**Tvrzení:** Pro každý výraz  $e$  a příkaz  $p$  platí

$$\llbracket \mathbf{while} \ e \ \mathbf{do} \ p \rrbracket = \llbracket \mathbf{if} \ e \ \mathbf{then} \ \mathbf{begin} \ p; \ \mathbf{while} \ e \ \mathbf{do} \ p \ \mathbf{end} \rrbracket$$

Důkaz dosazením do definice  $\llbracket \_ \rrbracket$ .

## Násobné větvení

**case**  $e$  **of**

$$v_1 \rightarrow p_1$$

$$v_2 \rightarrow p_2$$

$$\vdots$$

$$v_k \rightarrow p_k$$

$\llbracket \mathbf{case} \ e \ \mathbf{of} \ v_1 \rightarrow p_1, \dots, v_k \rightarrow p_k \rrbracket \sigma = \llbracket p_i \rrbracket \sigma$ , kde

$$i = \min\{j \mid 1 \leq j \leq k, \mathcal{M}\llbracket v_j \rrbracket \sigma = \mathcal{M}\llbracket e \rrbracket \sigma\},$$

existuje-li toto minimum, jinak  $\sigma$

## Výrazy s vedlejšími efekty

Připustíme, aby příkazy (tj. výrazy typu Command) byly podvýrazy výrazů jiného typu.

Pak jsou všechny výrazy stavovými transformátory  $\llbracket e \rrbracket : S \longrightarrow S$ , ale kromě toho vracejí hodnotu  $\mathcal{M}\llbracket e \rrbracket : S \longrightarrow \text{Val}$ .

Například v C ve stavu  $\sigma$ ,  $\sigma(x) = 5$ , je

$$\begin{aligned}\llbracket x++ \rrbracket \sigma &= \sigma', \quad \sigma'(x) = 6, \quad \sigma'(y) = \sigma(y) \text{ pro } y \neq x \\ \mathcal{M}\llbracket x++ \rrbracket \sigma &= 5\end{aligned}$$

$$\llbracket \mathbf{skip} \rrbracket = id$$

$$\llbracket x := e \rrbracket \sigma = \sigma', \quad x \in MVar$$

$$\sigma'(x) = \mathcal{M}\llbracket e \rrbracket \sigma$$

$$\sigma'(y) = (\llbracket e \rrbracket \sigma)(y) \text{ pro } y \in MVar - \{x\}$$

$$\llbracket e_l := e_r \rrbracket \sigma = \sigma', \quad v = \mathcal{M}\llbracket e_l \rrbracket (\llbracket e_r \rrbracket \sigma)$$

$$\sigma'(v) = \mathcal{M}\llbracket e_r \rrbracket \sigma$$

$$\sigma'(y) = (\llbracket e_l \rrbracket (\llbracket e_r \rrbracket \sigma))(y) \text{ pro } y \in MVar - \{v\}$$

$$\llbracket \mathbf{begin } p_1; \dots; p_k \mathbf{end} \rrbracket = \llbracket p_k \rrbracket \circ \dots \circ \llbracket p_1 \rrbracket$$

$$\llbracket \textbf{if } e \textbf{ then } p_1 \textbf{ else } p_2 \rrbracket \sigma = \begin{cases} \llbracket p_1 \rrbracket (\llbracket e \rrbracket \sigma), & \text{pokud } \mathcal{M} \llbracket e \rrbracket \sigma = tt \\ \llbracket p_2 \rrbracket (\llbracket e \rrbracket \sigma), & \text{pokud } \mathcal{M} \llbracket e \rrbracket \sigma = ff \\ \perp & \text{jinak} \end{cases}$$

$$\llbracket \textbf{while } e \textbf{ do } p \rrbracket \sigma = \begin{cases} \llbracket e \rrbracket \sigma, & \text{pokud } \mathcal{M} \llbracket e \rrbracket \sigma = ff \\ \llbracket \textbf{while } e \textbf{ do } p \rrbracket (\llbracket p \rrbracket (\llbracket e \rrbracket \sigma)) , & \text{pokud } \mathcal{M} \llbracket e \rrbracket \sigma = tt \\ \perp & \text{jinak} \end{cases}$$

## Řadicí příkazy

### Skoky

Explicitní přenesení řízení výpočtu do jiné části programu. Obvyklé ve starších jazycích a jazycích nižší úrovně. Většina jazyků klade na použití skoků omezení (například je možný jen skok do stejného nebo nadřazeného bloku).

Přílišné používání skoků vede k nečitelnému kódu a těžko odhalitelným chybám.

Například **go to** v C

## Úniky

Ukončují provádění složeného příkazu, který únikový příkaz obsahuje.

nejvnitřnější

$n$ -tý nejvnitřnější      **exit**  $n$

nejvnitřnější určitého druhu (cykly, case)      C: **continue**, **break**, Prolog: **!**

nejvnitřnější funkcionální či procedurální abstrakce      C: **return**

celý program      **halt**, Fortran: **stop**, sh: **exit**



## Výjimky

Mohou být ošetřeny procedurou pro *zpracování* výjimky (tzv. handler). Výjimka může být více, různých typů, a pro každou může být definováno jiné zpracování; různé části programu mohou definovat různá zpracování stejné výjimky.

Není-li výjimka zpracována (ošetřena), je *šířena* (propagována) do příkazu nadřazeného.

Některé výjimky jsou zabudované a vyvolávané zabudovanými operacemi, jiné lze uživatelsky definovat a *vyvolat* zvláštním příkazem (ML: **raise**, Java: **throw**).

*Oblast zpracování* (scope) výjimky je vymezena programovým blokem nebo zvláštní syntaxí (**try...end**).

## Volání funkcí a předávání parametrů

aplikace funkce (procedury) na argumenty – tzv. volání funkce (procedury).

Volání *hodnotou* – striktní vyhodnocení

Volání *jménem* – normální vyhodnocení

Volání *dle potřeby* – líné vyhodnocení (v referenčně transparentních jazycích).

Volání *odkazem* (referencí)

Volání *hodnotou*, *výsledkem*, *hodnotou-výsledkem*.

## Definice funkce (procedury)

$$f(x_1, \dots, x_n) = b$$

levá strana – <i>hlavička</i>	pravá strana – <i>tělo</i>
$x_1, \dots, x_n$ jsou <i>formální parametry</i>	výraz nebo příkaz

## Aplikace funkce (procedury) na argumenty

neboli *volání* funkce (procedury)

$$f(a_1, \dots, a_n)$$

*argumenty* (výrazy)

## Volání hodnotou

Nechť definice funkce (procedury) je  $f(x_1, \dots, x_n) = b$

a její volání je  $f(a_1, \dots, a_n)$ , kde  $a_1, \dots, a_n$  jsou výrazy.

Pak

$$\llbracket f(a_1, \dots, a_n) \rrbracket \sigma = \llbracket b \rrbracket \sigma'$$

$$\mathcal{M} \llbracket f(a_1, \dots, a_n) \rrbracket \sigma = \mathcal{M} \llbracket b \rrbracket \sigma'$$

kde pro všechna  $i$ ,  $1 \leq i \leq n$

$$\sigma_0 = \sigma$$

$$\sigma_i = \llbracket a_i \rrbracket \sigma_{i-1}$$

$$\sigma'(x_i) = \mathcal{M} \llbracket a_i \rrbracket \sigma_{i-1}$$

$$\sigma'(y) = \sigma_n(y) \text{ pro každé } y \notin \{x_1, \dots, x_n\}$$

## Volání jménem

Nechť definice funkce  $f$  je

$$f(x_1, \dots, x_n) = b$$

Pak

$$\llbracket f(a_1, \dots, a_n) \rrbracket \sigma = \llbracket b' \rrbracket \sigma$$

$$\mathcal{M} \llbracket f(a_1, \dots, a_n) \rrbracket \sigma = \mathcal{M} \llbracket b' \rrbracket \sigma$$

kde  $b'$  vznikne z  $b$  současnou substitucí výrazů  $a_1, \dots, a_n$  za všechny (volné) výskyty formálních parametrů  $x_1, \dots, x_n$ , tj.

$$b' = [a_1/x_1, \dots, a_n/x_n]b$$

Volání jménem se implementuje pomocí nulárních (bezparametrických) funkcí pro každý skutečný parametr předávaný jménem – tzv. *thunks*.

Př.:

```
function sum (i : Ref Int, m : Int, n : Int, name x : Real) : Real
  = begin s : Ref Real;
        s := 0;
        for i := m to n do s := (s) + x;
        return (s)
  end;

k : Ref Int;
⋮
sum (k, 1, 10, 1/(k * (k + 1)))
```

C:

```
double sum ( int *i, int m, int n, double (*x)() )
{
    double s;
    s = 0;
    for (*i = m; *i <= n; (*i)++) { s = s + (*x)(); }
    return s;
}

...
double thunk1 (void) { return 1/(k*(k+1)); }

...
sum (&k, 1, 10, &thunk1);
```

## Volání „dle potřeby“ – líná aplikace

Varianta volání jménem. Argumenty se však vyhodnocují nejvýše jednou. Používá se jen u referenčně transparentních jazyků, tedy u jazyků bez vedlejších efektů.

volání hodnotou	—	argumenty se vyhodnocují právě jednou
volání jménem	—	argumenty se vyhodnocují nula- nebo vícekrát
volání dle potřeby	—	argumenty se vyhodnocují nejvýše jednou



## Volání odkazem

Podobné volání hodnotou, ale skutečné parametry funkcí a procedur smějí být jen (adresovatelná) paměťová místa (Ref T) a *neprovádí* se jejich implicitní dereferencování.

Formální parametry jsou nepřepisovatelné proměnné typu „odkaz na hodnotu“ (Ref T) – např. v Pascalu.

Při simulaci pomocí volání hodnotou (např. v C) mohou být formální parametry přepisovatelné proměnné uchovávající přepisovatelné proměnné (Ref (Ref T)) – dereferencování je pak dvojnásobné.

Pascal:

```
var  $a, b$  : Real;  
procedure swap (var  $x, y$  : Real);  
    var  $z$  : Real;  
    begin  $z := x$ ;  
         $x := y$ ;  
         $y := z$   
    end;  
    ⋮  
swap ( $a, b$ )
```

```
 $a, b$  : Ref Real  
 $x, y$  : Ref Real  
 $z$  : Ref Real  
 $z := (x)$   
 $x := (y)$   
 $y := (z)$   
  
swap ( $a, b$ )
```

Implicitnímu dereferencování při volání zabrání způsob předávání parametrů.

C:

```
double a,b;
void swap (double *x, double *y)
{ double z;
  z = *x;
  *x = *y;
  *y = z;
}
...
swap (&a,&b)
```

```
a,b : Ref Real
x,y : Ref (Ref Real)
z : Ref Real
z := (*x)
*x := (*y)
*y := (z)
```

Implicitnímu dereferencování při volání zabrání statický operátor & – hodnotou se předají adresy

## Volání výsledkem

Skutečnými parametry mohou být jen výrazy typu Ref a, tj. adresovatelná paměťová místa (např. přepisovatelné proměnné, prvky přepisovatelných datových struktur ...).

Je-li definice funkce (procedury)

$$f(\mathbf{out} \ y_1, \dots, y_n) = b$$

Pak

$$\llbracket f(w_1, \dots, w_n) \rrbracket \sigma = \sigma''$$

$$\mathcal{M} \llbracket f(w_1, \dots, w_n) \rrbracket \sigma = \mathcal{M} \llbracket b \rrbracket \sigma_n$$

kde pro všechna  $i$ ,  $1 \leq i \leq n$

$$\sigma_i = \llbracket w_i \rrbracket \sigma_{i-1}, \quad \sigma_0 = \sigma$$

$$v_i = \mathcal{M} \llbracket w_i \rrbracket \sigma_{i-1}$$

$$\sigma' = \llbracket b \rrbracket \sigma_n$$

$$\sigma''(v_i) = \sigma'(y_i)$$

$$\sigma''(u) = \sigma'(u) \text{ pro } u \notin \{v_1, \dots, v_n\}$$

## Volání hodnotou-výsledkem

Skutečnými parametry mohou být jen adresovatelná paměťová místa.

Je-li definice procedury (funkce)  $f(\mathbf{inout} \ z_1, \dots, z_n) = b$

Pak 
$$\llbracket f(w_1, \dots, w_n) \rrbracket \sigma = \sigma'''$$

$$\mathcal{M} \llbracket f(w_1, \dots, w_n) \rrbracket \sigma = \mathcal{M} \llbracket b \rrbracket \sigma'$$

kde pro všechna  $i$ ,  $1 \leq i \leq n$  
$$\sigma_i = \llbracket w_i \rrbracket \sigma_{i-1}, \quad \sigma_0 = \sigma$$

$$v_i = \mathcal{M} \llbracket w_i \rrbracket \sigma_{i-1}$$

$$\sigma'(z_i) = \sigma_n(v_i)$$

$$\sigma'(u) = \sigma_n(u) \text{ pro } u \notin \{z_1, \dots, z_n\}$$

$$\sigma'' = \llbracket b \rrbracket \sigma'$$

$$\sigma'''(v_i) = \sigma''(z_i)$$

$$\sigma'''(u) = \sigma''(u) \text{ pro } u \notin \{v_1, \dots, v_n\}$$

## Smíšené volání – hodnotou, výsledkem, hodnotou-výsledkem

Jazyky, které podporují volání hodnotou, výsledkem, hodnotou-výsledkem, zpravidla dovolují, aby jedna víceparametrická funkce (procedura) své parametry vyhodnocovala různými způsoby, podle předpisu v hlavičce funkce (procedury).

$$f(\mathbf{in} \ x_1, \dots, x_m, \mathbf{out} \ y_1, \dots, y_n, \mathbf{inout} \ z_1, \dots, z_r) = b$$

Volání odkazem a volání hodnotou-výsledkem mají různou sémantiku.

Když se během zpracování funkce či procedury mění obsah přepisovatelné proměnné určené formálním parametrem předávaným odkazem, mění se *současně* obsah přepisovatelné proměnné, která je skutečným argumentem při volání.

Naproti tomu, když se mění obsah přepisovatelné proměnné určené formálním parametrem předávaným hodnotou-výsledkem, dějí se tyto změny *pouze lokálně* a obsah skutečného argumentu se změní až v okamžiku návratu.

Tento rozdíl může mít (zejména při nečistém stylu programování) vliv na výsledný stav.

```
var  $a, b$  : Int;  
function  $f$  (ref/inout  $x$  : Int) : Int  
{  $x := 1$ ;  
   $a := a + 1$ ;  
  return  $x$ ;  
}  
  
 $a := 1$ ;  
 $b := f(a)$ ;
```

# Viditelnost



# Viditelnost jazykových entit

## Statická

Pro každou definici jazykové entity (konstanty, proměnné, typu, ...) je tzv. statickou sémantikou určena oblast platnosti definice.

### **Blokové jazyky** (Pascal, Modula, Algol68, ...)

Stromová struktura.

Globální a lokální entity.

### **Modulární jazyky** (C, Modula, ...)

Moduly se vzájemně nevnořují, ale mohou být tvořeny blokem.

Třídy viditelnosti: *public* / *private*.

**Objektové jazyky** – z hlediska viditelnosti podobné modulárním, rozlišují třídy a objekty.

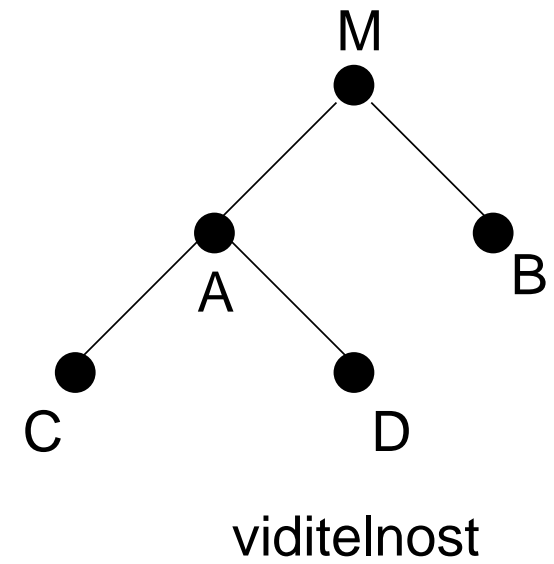
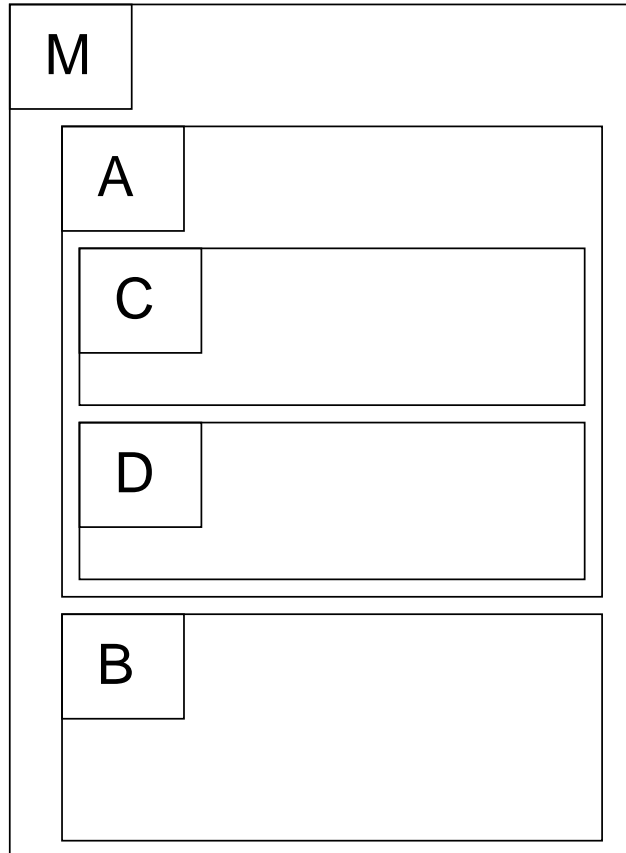
### **Amorfní jazyky** (Basic)

Nepoužitelné pro „programování ve velkém“.

## Dynamická

Viditelnost jazykových entit závisí na momentálně aktivních programových jednotkách (blocích, funkcích, procedurách, ...) v době běhu.

Téměř nepoužívaná (Lisp, Snobol, APL).

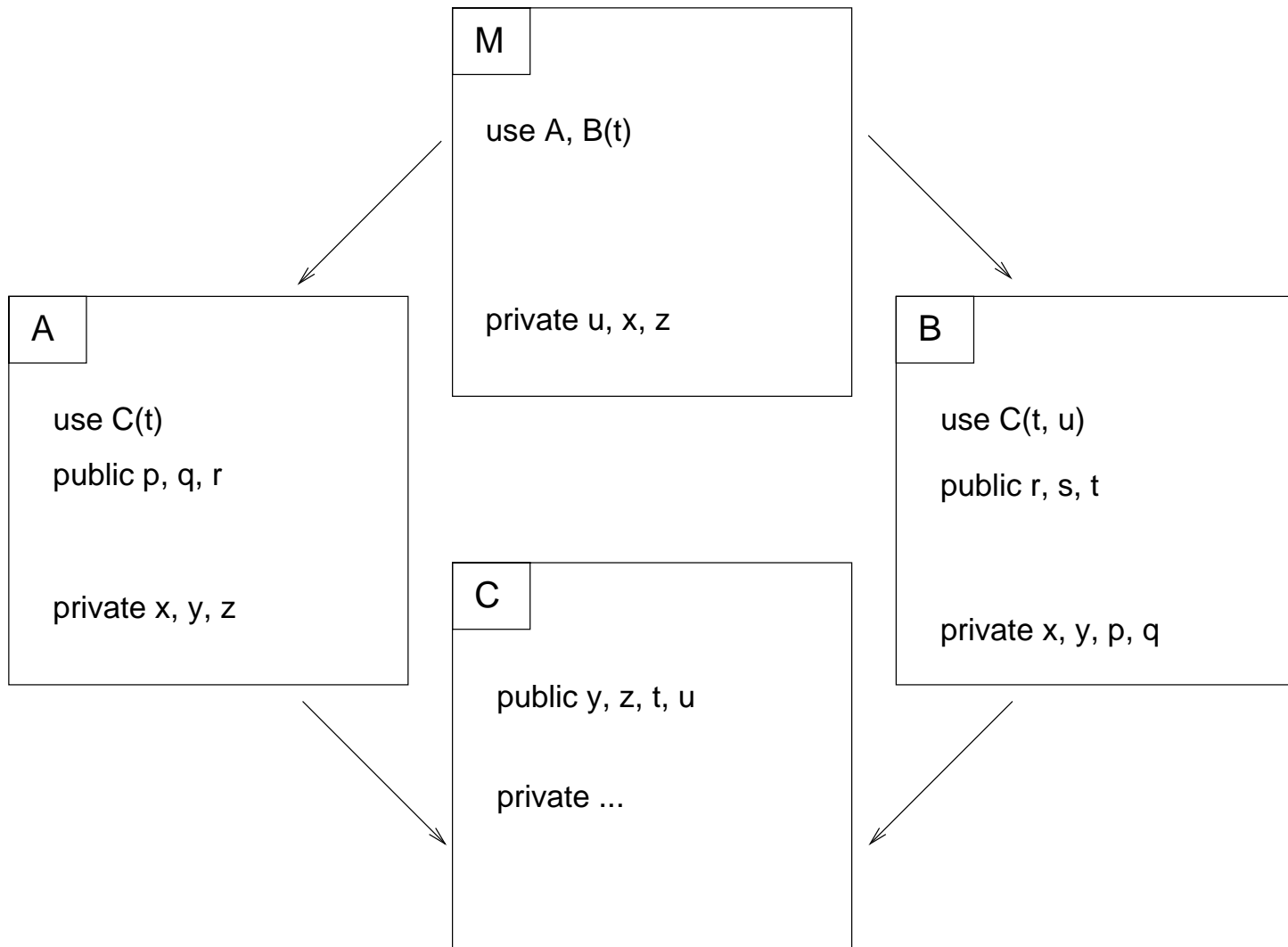


*Oblast působnosti* (scope) v jazycích s blokovou viditelností je podobná jako v matematickém zápisu:

$$\forall x \in A \exists f:A \rightarrow B. f(x) = b \wedge \forall x \in A. f(x) \leq b$$

Množina pojmenovaných entit známých v dané oblasti působnosti zhruba odpovídá pojmu *jmenný prostor*. Avšak:

- (i) některé jazyky mohou se jmennými prostory zacházet explicitně a nezávisle na jmenných prostorech implicitně určených bloky nebo moduly (C++);
- (ii) jmenné prostory mohou být rozděleny na disjunktní části podle druhů pojmenovávaných entit – jména pro proměnné zvlášť, jména pro typy zvlášť, jména pro moduly zvlášť ...



## Dynamická viditelnost v Lispu

```
(define (f (lambda (x) (+ x y))))  
(define (g (lambda (y) (* (f 2) y))))  
(define (h (lambda (y) (+ (f y) (g (f 5))))))
```

```
(h 2) y = 2
```

```
(+ (f 2) (g (f 5))) x = 2
```

```
(+ (+ 2 2) (g (f 5)))
```

```
(+ 4 (g (f 5))) x = 5
```

```
(+ 4 (g (+ 5 2)))
```

```
(+ 4 (g 7)) y = 7
```

```
(+ 4 (* (f 2) 7)) x = 2
```

```
(+ 4 (* (+ 2 7) 7))
```

67

## Omezování viditelnosti – zapouzdření

### Moduly

Ada: **package** *ph* **is**

*c*: constant Float = 3e8

*G*: constant Float = 6.7e−11

*h*: constant Float = 6.6e−34

**end** *ph*

definuje uspořádanou trojici  $(c, G, h)$ , ale její selektory jsou viditelné jen lokálně, tj. *c*, *G*, *h* jakožto funkce mají jednoprvkový definiční obor  $\{ph\}$ .

Zápis: *ph.c*, *ph.G*, *ph.h*.

Na rozdíl od agregátů (uspořádaných *n*-tic) mohou mít moduly i lokálně definované typy (popřípadě jiné jazykové entity).

Typy i data mohou být privátní (neexportovatelné) a veřejné (exportovatelné).

# Třídy a objekty

## Objekt

je modul se skrytými (privátními) přepisovatelnými proměnnými (tzv. *atributy*) a s veřejnými operacemi (tzv. *metodami*) nad těmito proměnnými .

## Třída

(„generický objekt“) popisuje typ objektu.

Vlastní objekty se nazývají *instance* třídy a vytvářejí se zvlášť:

- deklarací – statické objekty
- příkazem – dynamické objekty

Definice třídou exportovaných atributů a metod je součástí

- definice třídy – *statické* metody, případně atributy
- deklarace instance – atributy (někdy i metody)



## Dědičnost

mezi třídami je zavedena relace podtříd ( $\leq$ ).

Třída  $A$  je *podtřídou* třídy  $B$  (značíme  $A \leq B$ ), když dědí metody třídy  $B$  a případně přidává další.

Dědičnost je *jednoduchá*, má-li každá třída nejvýše jednu bezprostřední nadtřidu. Jinak je dědičnost *násobná*.

# Vlastnosti OO jazyků

Třídy a objekty (statické nebo dynamické).

Dědičnost a inkluzní polymorfismus

- typový systém s podtypy

$$a : A, A \leqslant A' \Rightarrow a : A'$$

Viditelnost omezená na objekty a řízená pomocí public / private (příp. protected).

V (dynamických) objektech mohou být atributy i metody

- statické – definované ve třídách
- dynamické – definované v objektech

## OO jazyky

**Simula 67** považována za nejstarší jazyk, v němž se poprvé objevily některé principy OO programování

**Smalltalk** první čistě objektový OO jazyk; netypovaný

**Eiffel** čistě objektový, typovaný

**C++** původně jen rozšíření C pomocí makrojazyka cpp, není čistě objektové

**Java** spolu s C++ nejrozšířenější, není čistě objektová (má i primitivní typy, které nejsou třídami), ale má čistší design než C++

**Python, Ruby** interpretovaný bytový kód

**Ada** staticky typovaná, vznikla na zakázku MO USA na konci 70. let; pojmenovaná po Lady Lovelace

**OCaML** objektová verze funkcionálního jazyka ML

# Správa paměti

# Paměťové třídy dat

## Persistentní data

existují nezávisle na výpočtu, jsou spravována souborovým podsystémem operačního systému. Obvykle jsou umístěna na vnějších paměťových médiích (soubory, databáze).

## Transientní data

existují pouze po dobu výpočtu. Jsou obvykle umístěna v dostupné (procesem adresovatelné) části operační paměti (hodnoty proměnných, parametrů, obsahy přepisovatelných proměnných, ...), ale i vně (dočasné soubory, data na portech, ...).

V prostředí souběžného zpracování procesů je rozlišení dat na persistentní a transientní relativní.

Paměťová transientní data:

- Statická
- Automatická (zásobníková)
- Dynamická (haldová)

# Správa paměti

## Statická

prováděná překladačem (*statická data*, třída static, own).

[instrukce programu, systémová data, statická data, vyrovnávací paměti, ...]

## Zásobníková

v době výpočtu při zahájení/ukončení aktivace procedury, bloku, aplikace funkce na argumenty (*automatická data*, třída auto).

[lokální data v blocích, parametry funkcí a procedur, pomocné datové struktury ve funkcích, návratové adresy, ...]

## Dynamická

v době výpočtu, prováděná speciálními procedurami pro alokaci, dealokaci, přesouvání, scelování, ... (*dynamická data*, třída dynamic).

1. řízená explicitně programem [malloc, free, new, dispose, mark, release]
2. spouštěná výhradně „run-time podporou“ výpočtu [garbage collecting, setřásání]

## Fáze správy paměti

**alokace** (přidělení)

**dealokace** (uvolnění)

**obnovení volné paměti** může vyžadovat *gc*

**scelování** – změna polohy obsazených a volných bloků

- částečné
- úplné



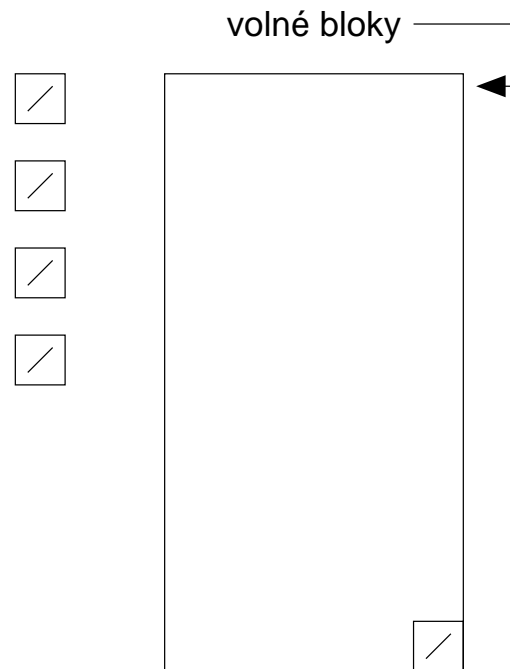
## Problémy:

- smetí ( $\Rightarrow$  gc)
- slepé odkazy
- fragmentace ( $\Rightarrow$  částečné scelování)

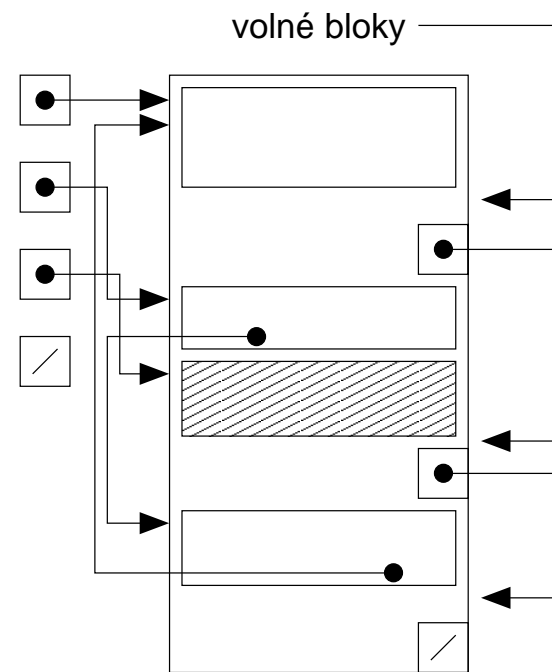
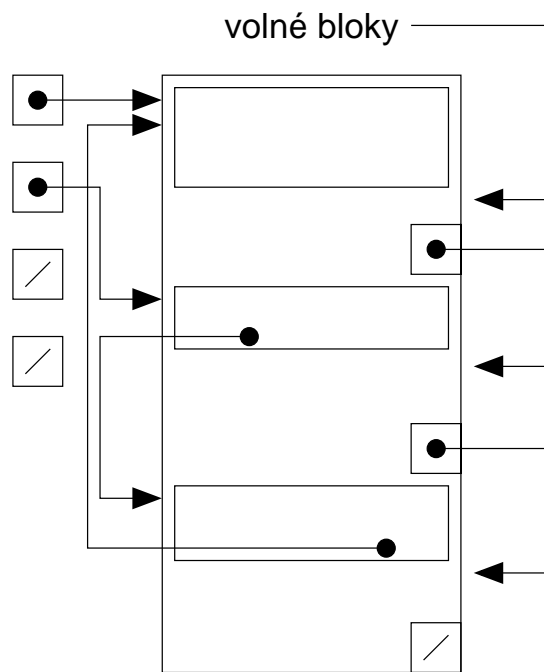
# Správa dynamické paměti

## Inicializace

vytvoření seznamu volných bloků, seznamu mimořádných ukazatelů

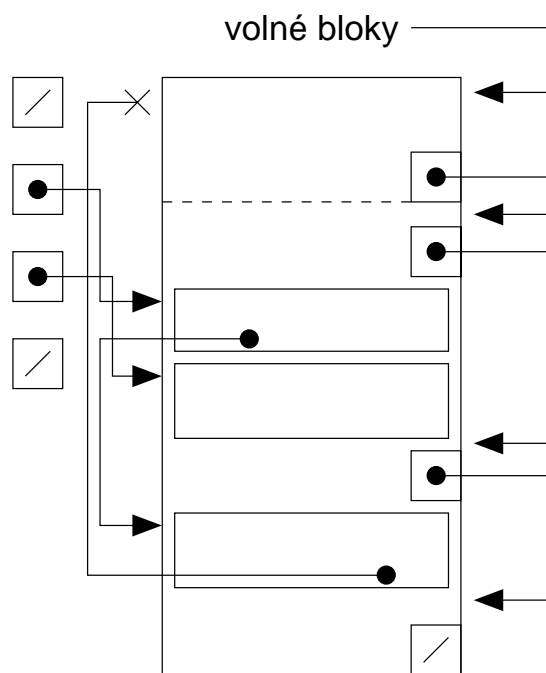


## Alokace bloku požadované velikosti

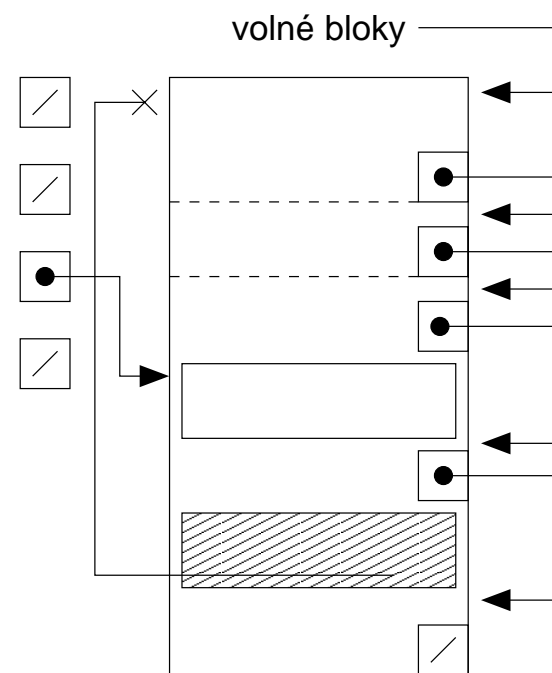


## Uvolnění bloku

nekorektní – vznik slepého odkazu



nekorektní – vznik smetí

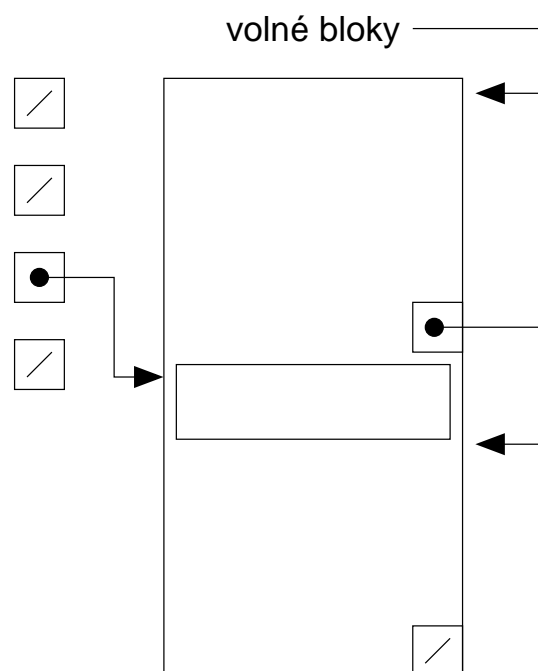


## Úklid smetí (garbage collection)

- každý alokovaný blok má příznak dostupnosti (1 bit)
- všechny příznaky dostupnosti se nastaví na „nedostupné“
- postupuje se od známých ukazatelů a všechny navštívené bloky se označí „dostupné“ (při návštěvě bloku již označeného za „dostupný“ se hlouběji nepokračuje)
- nakonec se všechny nedostupné bloky zařadí do seznamu volných

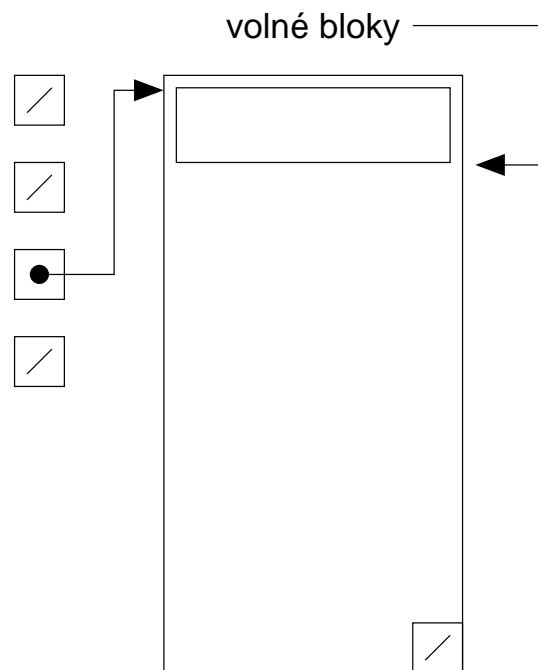
## Scelování (spojování sousedních volných bloků)

je snazší, pokud se seznam volných bloků udržuje uspořádaný podle adres



## Setřásání (úplné scelování)

způsobí změny ukazatelů



# Paradigmata



## Deklarativní paradigmata

Program popisuje, *co* je výsledkem.

*Funkcionální* – program je výraz a výpočet je jeho úprava.

*Logické* – program je teorie a výpočet je odvození z ní.

## Imperativní paradigmata

Program popisuje, *jak* se dospěje k výsledku.

*Procedurální* – výpočet je provádění procedur nad daty.

*Objektové* – výpočet je předávání zpráv mezi objekty.

# Logické paradigma

Patří mezi deklarativní paradigmata.

Logické programy popisují vztahy mezi hodnotami pomocí tzv. Hornových klausulí.

Program se skládá ze seznamu klausulí (teorie) a z formule (cíle, dotazu). Výpočet je hledáním tzv. splňujících substitucí, tj. takových ohodnocení proměnných z cíle, při nichž cíl vyplývá (lze odvodit) z teorie.

Abstraktní syntax prototypového logického jazyka:

$$\text{Program} ::= \text{Klausule}^* \text{ Formule}$$
$$\text{Klausule} ::= \text{Formule} :- \text{Formule}^*$$
$$\text{Formule} ::= \text{Pred} (\text{Term}^*)$$
$$\text{Term} ::= \text{Var} \mid \text{Fun} (\text{Term}^*)$$

Pred, Fun, Var označují predikátové symboly, funkční symboly a proměnné.

Kontextová omezení (Statická sémantika)

Predikátové a funkční symboly mají konsistentní arity, tj.

$$\begin{aligned} \forall P \in \widehat{\text{Pred}} \exists! a \in N \forall \varphi \in \widehat{\text{Formule}}. \varphi = P(t_1, \dots, t_n) \Rightarrow n = a \\ \forall F \in \widehat{\text{Fun}} \exists! a \in N \forall t \in \widehat{\text{Term}}. t = F(t_1, \dots, t_n) \Rightarrow n = a \end{aligned}$$

$Rodič(Marie, Karel).$

$Rodič(Jan, Karel).$

$Rodič(Jan, Petr).$

$Rodič(Jana, Alena).$

$Rodič(Karel, Alena).$

$Sourozenec(x, y) :- Rodič(z, x), Rodič(z, y).$

$Potomek(x, y) :- Rodič(y, x).$

$Potomek(x, y) :- Rodič(y, z), Potomek(x, z).$

Levá strana (tj. závěr) implikace se nazývá *hlava klausule*.

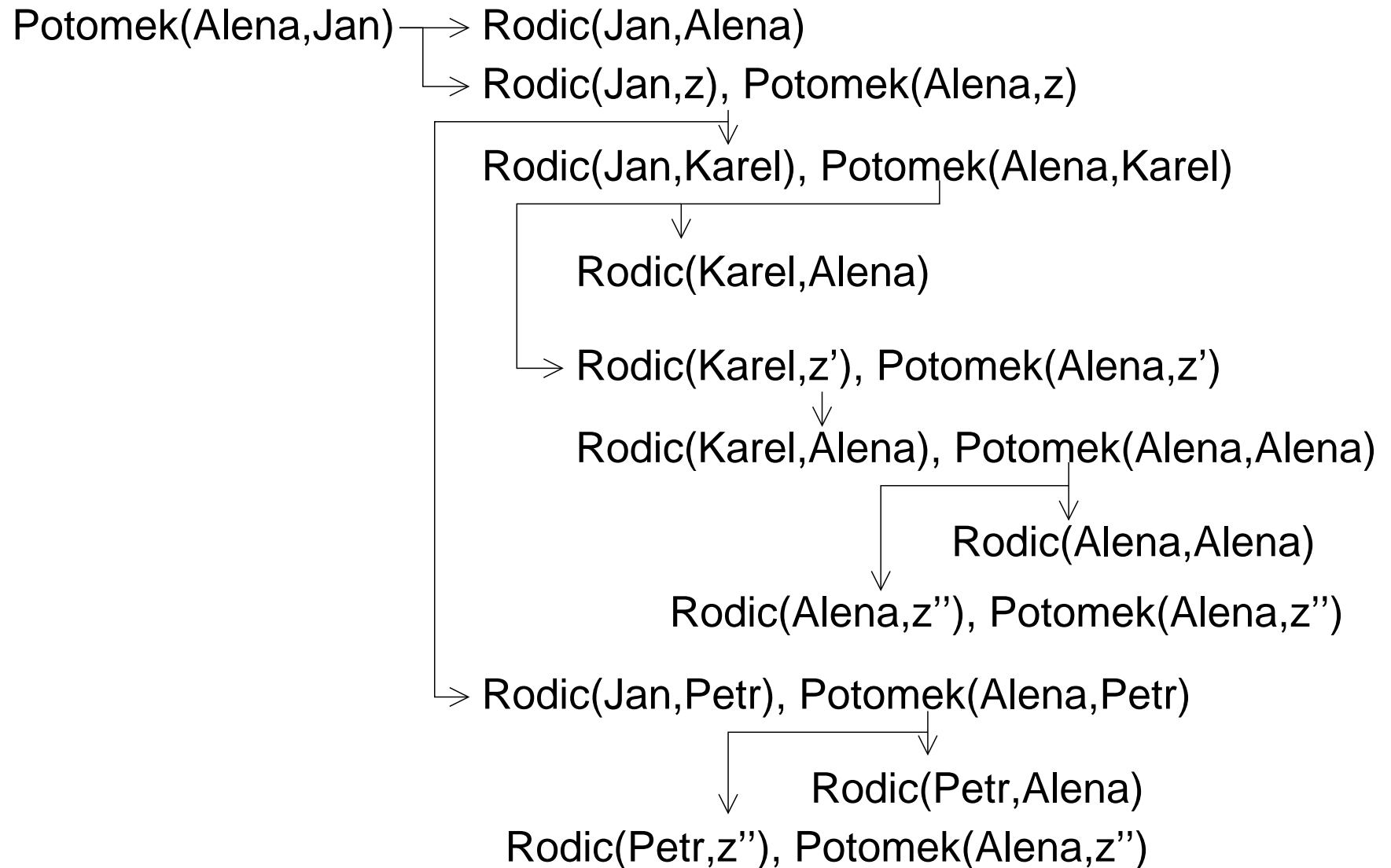
Předpoklady implikace se nazývají *podcíle*.

Klausule s nulovým počtem podcílů je tzv. *fakt*.

Proměnné v klausuli, které se vyskytují na levé straně klausule (v hlavě), jsou implicitně univerzálně kvantifikovány. Ostatní proměnné v klausuli (ty, jež se vyskytují jen na pravé straně – v podcílech) jsou implicitně existenčně kvantifikovány. (Proměnné jsou tedy v klausulích lokální!)

Např.

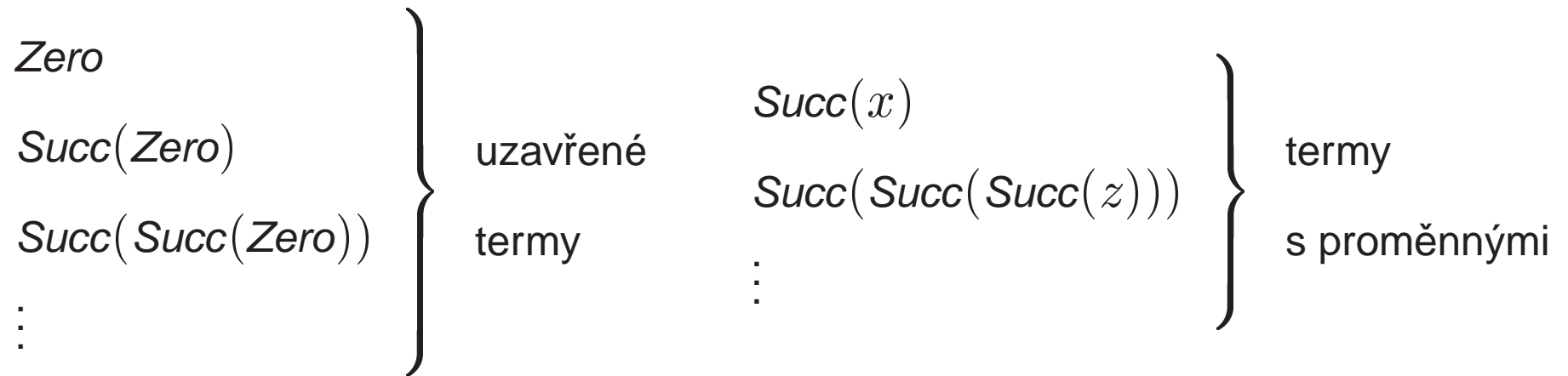
$$\forall x \forall y . \textit{Potomek}(x, y) \Leftarrow \exists z . \textit{Rodič}(y, z) \wedge \textit{Potomek}(x, z)$$



## Termy

*Zero* – nulární funkční symbol (konstanta)

*Succ* – unární funkční symbol



## Klausule

*LessThan*(*Zero*, *Succ*(*y*)).

*LessThan*(*Succ*(*x*), *Succ*(*y*)) :- *LessThan*(*x*, *y*).

## Dotaz

*LessThan*(*x*, *Succ*(*Succ*(*Zero*))).

## Příklad: ternární relace spojování seznamů

$Append( Nil, y, y ).$

$Append( Cons(x, s), t, Cons(x, u) ) :- Append( s, t, u ).$

$Append( Nil, Cons(A, Cons(B, Nil)), Cons(B, Cons(A, Nil)))$   
*no.*

$Append( Cons(A, Nil), Nil, Cons(A, Nil) )$   
*yes.*



*Append*(*Nil*, *y*, *y*).

*Append*(*Cons*(*x*, *s*), *t*, *Cons*(*x*, *u*)) :- *Append*(*s*, *t*, *u*).

*Append*(*v*, *Cons*(*B*, *Nil*), *Cons*(*B*, *Cons*(*B*, *Nil*)))  
*v* = *Cons*(*B*, *Nil*).

*Append*(*Cons*(*A*, *Nil*), *w*, *Nil*)  
*no*.

*Append*(*v*, *Cons*(*B*, *Nil*), *Cons*(*A*, *Cons*(*x*, *Nil*)))  
*v* = *Cons*(*A*, *Nil*),   *x* = *B*.

*Append*(*Nil*, *y*, *y*).

*Append*(*Cons*(*x*, *s*), *t*, *Cons*(*x*, *u*)) :- *Append*(*s*, *t*, *u*).

*Append*(*v*, *w*, *Cons*(*A*, *Cons*(*B*, *Nil*)))

*v* = *Nil*,    *w* = *Cons*(*A*, *Cons*(*B*, *Nil*));

*v* = *Cons*(*A*, *Nil*),    *w* = *Cons*(*B*, *Nil*);

*v* = *Cons*(*A*, *Cons*(*B*, *Nil*)),    *w* = *Nil*.

# Sémantika logického programu

## Substituce

*Subst* je množina všech substitucí, tj. konečných zobrazení

$$Var \longrightarrow_f GTerm$$

kde  $GTerm = \{\tau \in Term \mid \tau \text{ neobsahuje proměnné}\}$  je množina všech tzv. *uzavřených* termů.

Každou substituci  $\sigma : Var \longrightarrow GTerm$  lze jednoznačně homomorfně rozšířit na termy, čímž dostaneme rozšířenou substituci  $\bar{\sigma} : Term \longrightarrow GTerm$ .

Pro každou proměnnou  $v$ , konstantu (nulární funkční symbol)  $g$ ,  $n$ -ární funkční symbol)  $f$  a libovolné termy  $t_1, \dots, t_n$  je

$$\bar{\sigma}(v) = \sigma(v)$$

$$\bar{\sigma}(g) = g$$

$$\bar{\sigma}(f(t_1, \dots, t_n)) = f(\bar{\sigma}(t_1), \dots, \bar{\sigma}(t_n))$$

Unifikátor  $\sigma$  formulí  $p, q$  je substituce taková, že  $\bar{\sigma}(p) = \bar{\sigma}(q)$ .

Nejobecnější unifikátor  $\sigma$  formulí  $p, q$  je jejich unifikátor, který má minimální definiční obor: po zúžení substituce  $\sigma$  na méně proměnných přestane být zúžená substituce unifikátorem:

$$\bar{\sigma}(p) = \bar{\sigma}(q) \quad \text{a} \quad \forall D \subset \text{Dom } \sigma. \overline{\sigma|_D}(p) \neq \overline{\sigma|_D}(q)$$

## Sémantika

$$\mathcal{M}[\_] : \text{Programy} \longrightarrow \mathcal{P}(\text{Subst})$$

$$\mathcal{M}[(c, q)] = \{ \sigma \in \text{Subst} \mid c \vdash \bar{\sigma}(q), \forall D \subset \text{Dom } \sigma. c \not\vdash \overline{\sigma|_D}(q) \}$$

Přitom  $\vdash$  je relace tzv. odvoditelnosti cíle definovaná:

$$\begin{array}{c} c = [ \quad f_{1,0} :- f_{1,1}, \dots, f_{1,m_1} \\ \quad \quad \quad \vdots \\ \quad \quad \quad f_{n,0} :- f_{n,1}, \dots, f_{n,m_n} \quad ] \vdash q \end{array}$$

$\Leftrightarrow$

$$\exists \sigma \in \text{Subst} \exists i, 1 \leq i \leq n. \bar{\sigma}(q) = \bar{\sigma}(f_{i,0}) \wedge \forall j, 1 \leq j \leq m_i. c \vdash \bar{\sigma}(f_{i,j})$$

Výsledkem výpočtu je *množina substitucí*.

$$\begin{array}{ll} \mathcal{M}[[p]] = \emptyset & \dots\dots\dots \text{„No.“} \\ \mathcal{M}[[p]] = \{\perp\} & \dots\dots\dots \text{„Yes.“} \end{array}$$

**Příklad:** Ze sbírky hádanek pro chytré děti:

*Jeden pes zje za jednu hodinu jednu kost'. Koľko psův zje za koľko hodin koľko kostí?*

Správnou odpovědí je množina substitucí za „koľko“, „koľko“ a „koľko“ (zde nekonečná, aby s ní děti nebyly příliš rychle hotovy; jestli neumřely, generují ji dodnes).

Logické jazyky s (positivními) Hornovými klausulemi implicitně předpokládají úplnost teorie (tj. nelze-li dotaz z teorie odvodit, pak je „No“) – tzv. „closed world assumption“.

## Řízení výpočtu

Ve většině logických jazyků záleží na pořadí klausulí a na pořadí podcílů v klausuli (prostor substitucí se prohledává systematicky, takže i když řešení existuje, nemusí se při nevhodném pořadí klausulí najít, anebo když řešení neexistuje, nemusí se to v konečném čase zjistit).

Operátor ! (řez) v Prologu je řídicím operátorem, který zabraňuje opakovanému vyhodnocování podcíle, jestliže tento podcíl již jednou uspěl.

$$f_0 \text{ :- } f_1, !, f_2.$$

Pokud  $f_1$  uspěje a  $f_2$  následně neuspěje, nehledá se už další úspěšná substituce pro  $f_1$ .

$$f_0 \text{ :- } !.$$

Pokud se najde unifikátor pro  $f_0$ , nezkouší se s cílem unifikovat jiná klausule.

## Gödel

```
MODULE      GCD.
IMPORT      Integers.
PREDICATE   Gcd : Integer * Integer * Integer.
Gcd(i,j,d) <-
    CommonDivisor(i,j,d) &
    ~ SOME [e] (CommonDivisor(i,j,e) & e > d).
PREDICATE   CommonDivisor : Integer * Integer * Integer.
CommonDivisor(i,j,d) <-
    IF (i = 0 \ / j = 0)
    THEN
        d = Max(Abs(i),Abs(j))
    ELSE
        1 =< d =< Min(Abs(i),Abs(j)) &
        i Mod d = 0 &
        j Mod d = 0.
```



# Logické jazyky

## Prolog

- 70. léta, Marseille, Edinburgh
- netypovaný jazyk
- plochá struktura a viditelnost:
  - všechny predikáty jsou globální
  - všechny proměnné jsou lokální (v klauzuli)
- není čistě logický
- nejrozšířenější logický jazyk (např. na FI *Sicstus Prolog*)

## Gödel

- 90. léta, Bristol (J. W. Lloyd)
- typovaný jazyk
- modulární struktura
- parametrický polymorfismus
- P. M. Hill, J. W. Lloyd : The Gödel Programming Language, MIT Press 1994

## Mercury

- multiparadigmatický jazyk (logický + funkcionální)
- polovina 90. let
- <http://www.cs.mu.oz.au/research/mercury/>

# Aplikace logického programování

- zpracování přirozeného jazyka
- expertní systémy
- symbolická manipulace s výrazy, řešení rovnic
- simulace

## Výhody

- vyšší úroveň, tj. program je bližší popisu problému než implementaci
- logika programu oddělena od řízení výpočtu
- snazší důkazy korektnosti

## Nevýhody

- efektivita
- nevýhodné pro aplikace s intenzivním I/O

## Funkcionální paradigma

Patří k deklarativním paradigmátům.

## Rysy funkcionálních jazyků

- Nerozlišuje stavy, výpočet je jednostavový. Nemá tedy selektory složek stavu, tj. přepisovatelné proměnné.
- jazyky vycházejí z lambda kalkulu nebo kombinátorového kalkulu, tedy pracují především s funkcemi a funkce jsou hodnotami „první kategorie“.
- Vysoká míra ortogonality.
- bohatý typový systém – parametrický polymorfismus, typové funkce a třídy
- uživatelské typy
- definice podle vzoru
- funkce vyššího řádu, kombinátory
- líné vyhodnocování, nekonečné datové struktury

## Sémantika funkcionálního jazyka

Nepracuje se se stavy.

Hodnotový kontext (prostředí)

$$\varepsilon : Var \longrightarrow Val$$

$Env$  ... množina všech hodnotových kontextů

Sémantická funkce

$$\mathcal{M} : Term \times Env \longrightarrow Val$$

$Val$  ... sémantická doména

v totálních jazycích množina

v parciálních jazycích jeden CPO (v netypovaných)

nebo systém CPO (v typovaných)

## CPO

CPO – jazyková katachréze, algebraická realita. :-)

CPO je uspořádaná množina, v níž má každý nejvýše spočetný řetězec supremum.

### monotonní funkce

$f$  je monotonní, právě když pro každé dva prvky  $x, y$  takové, že  $x \sqsubseteq y$ , platí

$$f(x) \sqsubseteq f(y)$$

### spojité funkce

$f$  je spojitá, právě když pro každý spočetný řetězec  $x_1, x_2, \dots$  platí

$$f\left(\bigsqcup (x_1, x_2, \dots)\right) = \bigsqcup (f(x_1), f(x_2), \dots)$$

**Věta:** Každá spojitá funkce je monotonní.

**Poznámka:** Obrácená věta neplatí. Existují monotonní nespojité funkce

**Věta:** Každá monotonní funkce na konečné doméně je spojitá.



## Sémantické domény

Primitivní, tzv. *plaché*: Unit, Bool, Nat, Integer, Char

Operace nad doménami

Lift  $\_$       přidání nejmenšího prvku  $\perp$

$\_ \times \_$       kartézský součin

$\_ + \_$       disjunktí sjednocení

$\_ \rightarrow \_$       mocnina (doména spojitých funkcí)

## Uspořádaní na doménách

$$\forall x \in \text{Lift } D . \perp \sqsubseteq_{\text{Lift } D} x$$

$$\forall x, y \in D . (x \sqsubseteq_D y \Leftrightarrow x \sqsubseteq_{\text{Lift } D} y)$$

$$\forall x_1, y_1 \in D_1 \ \forall x_2, y_2 \in D_2 .$$

$$(x_1 \sqsubseteq_{D_1} y_1 \wedge x_2 \sqsubseteq_{D_2} y_2 \Leftrightarrow (x_1, x_2) \sqsubseteq_{D_1 \times D_2} (y_1, y_2))$$

$$\forall x_1, y_1 \in D_1 \ \forall x_2, y_2 \in D_2 .$$

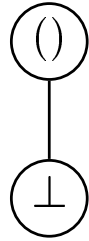
$$((x_1 \sqsubseteq_{D_1} y_1 \Leftrightarrow x_1 \sqsubseteq_{D_1 + D_2} y_1) \wedge (x_2 \sqsubseteq_{D_2} y_2 \Leftrightarrow x_2 \sqsubseteq_{D_1 + D_2} y_2))$$

$$\forall f, g \in D_1 \rightarrow D_2 . (f \sqsubseteq_{D_1 \rightarrow D_2} g \Leftrightarrow \forall x \in D_1 . f(x) \sqsubseteq_{D_2} g(x))$$

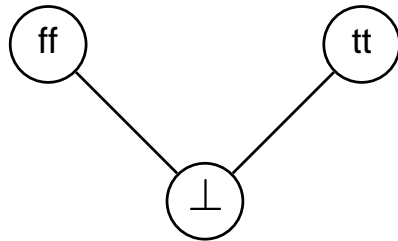
Unit



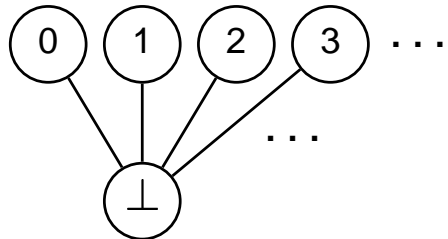
Unit<sub>⊥</sub> = Lift Unit



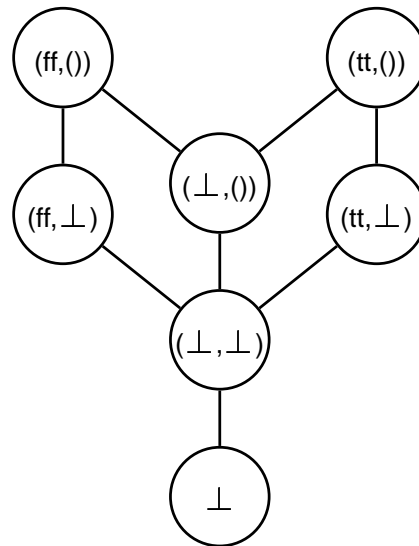
Bool<sub>⊥</sub>



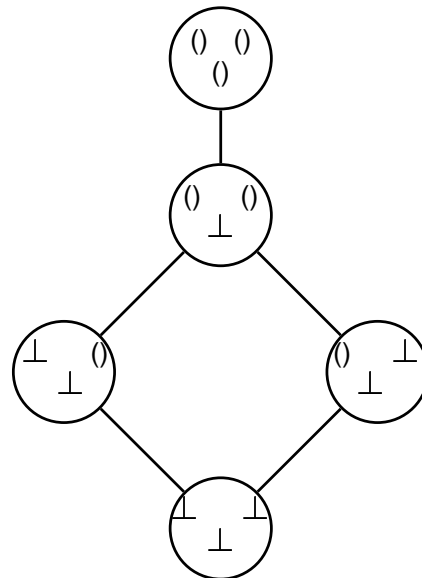
Nat<sub>⊥</sub>



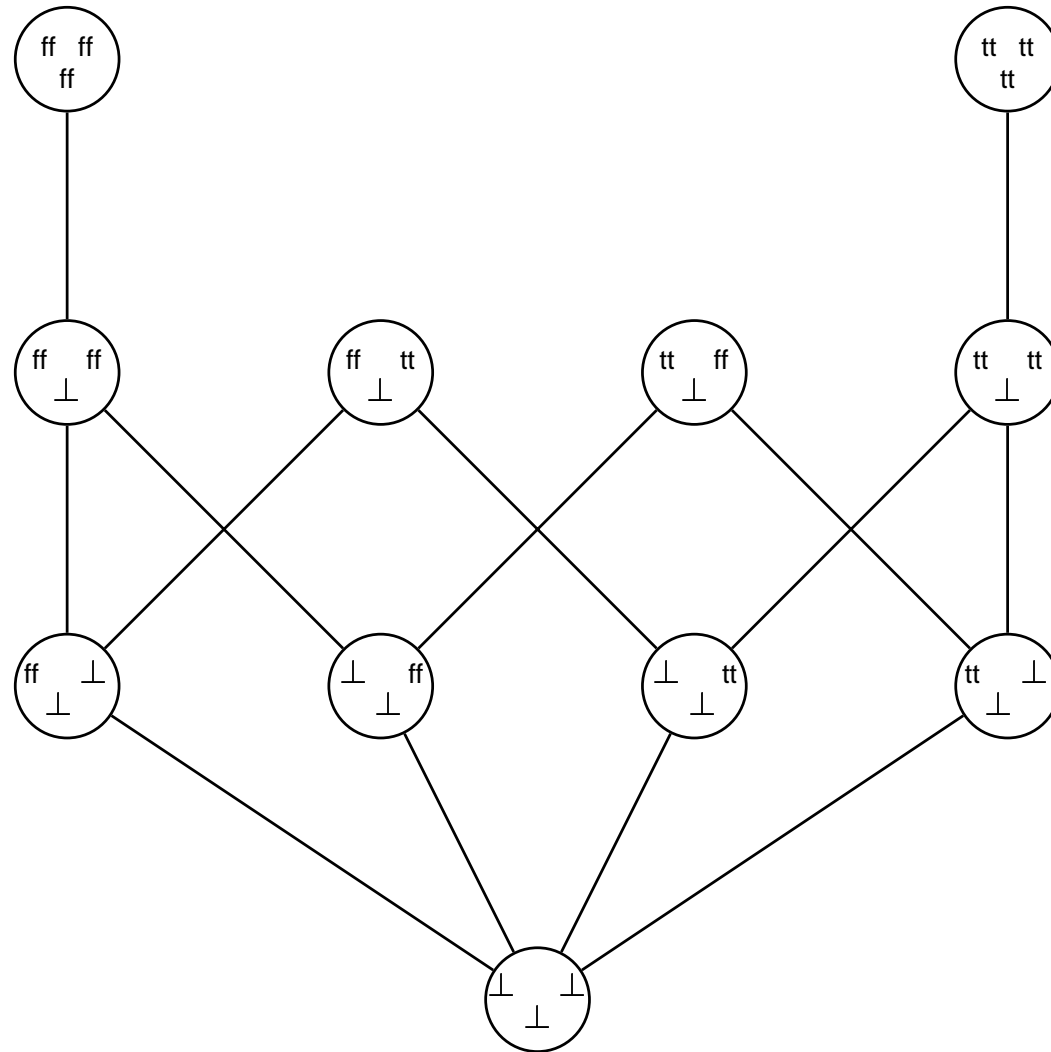
$\text{Lift}(\text{Bool}_\perp \times \text{Unit}_\perp)$



$\text{Bool}_\perp \rightarrow \text{Unit}_\perp$



$\text{Bool}_{\perp} \rightarrow \text{Bool}_{\perp}$



## Sémantika konstant

nezávisí na hodnotovém kontextu  $\varepsilon$ .

Pro libovolné  $\varepsilon \in Env$

$$\mathcal{M}[\mathit{True}]_{\varepsilon} = tt$$

$$\mathcal{M}[\mathit{False}]_{\varepsilon} = ff$$

$$\mathcal{M}[0]_{\varepsilon} = 0$$

$$\vdots$$

$$\mathcal{M}[\mathit{succ}]_{\varepsilon} : Val \rightarrow Val, \dots$$

$$\mathcal{M}[\mathit{iszero}]_{\varepsilon} \quad \dots$$

$$\mathcal{M}[\mathit{not}]_{\varepsilon} \quad \dots$$

$$\vdots$$

## Sémantika výrazů

$$\mathcal{M}[[x]]\varepsilon = \varepsilon(x)$$

$$\mathcal{M}[[f\ e]]\varepsilon = (\mathcal{M}[[f]]\varepsilon)(\mathcal{M}[[e]]\varepsilon) \quad \text{[líná aplikace]}$$

$$\mathcal{M}[[g\ e]]\varepsilon = \begin{cases} \perp, & \text{když } \mathcal{M}[[e]]\varepsilon = \perp \\ (\mathcal{M}[[g]]\varepsilon)(\mathcal{M}[[e]]\varepsilon) & \text{jinak} \end{cases} \quad \text{[strikní aplikace]}$$

$$\mathcal{M}[[\lambda x. e]]\varepsilon = f \text{ taková funkce z } Val \rightarrow Val, \\ \text{že } \forall t \in Val. f(t) = \mathcal{M}[[e]](\varepsilon[x \mapsto t])$$

$$\mathcal{M}[\text{if } e \text{ then } e' \text{ else } e'']_{\varepsilon} = \begin{cases} \mathcal{M}[e']_{\varepsilon}, & \text{když } \mathcal{M}[e]_{\varepsilon} = tt \\ \mathcal{M}[e'']_{\varepsilon}, & \text{když } \mathcal{M}[e]_{\varepsilon} = ff \\ \perp & \text{jinak} \end{cases}$$



## Sémantika nerekursivních definic

$$\mathcal{M}[\![\mathbf{let} \ v = e_1 \ \mathbf{in} \ e]\!]\varepsilon = \mathcal{M}[\!(\lambda v. e) \ e_1]\!\varepsilon = \mathcal{M}[\![e]\!](\varepsilon[v \mapsto \mathcal{M}[\![e_1]\!]\varepsilon])$$

$$\begin{aligned} \mathcal{M}[\![\mathbf{let} \ v_1 = e_1, \dots, v_n = e_n \ \mathbf{in} \ e]\!]\varepsilon &= \\ \mathcal{M}[\![\mathbf{let} \ v_1 = e_1 \ \mathbf{in} \ (\mathbf{let} \ v_2 = e_2 \ \mathbf{in} \ (\dots (\mathbf{let} \ v_n = e_n \ \mathbf{in} \ e) \dots))]\!]\varepsilon &= \\ \mathcal{M}[\!(\lambda v_1 (\lambda v_2 \dots ((\lambda v_{n-1} (\lambda v_n. e) e_n) e_{n-1}) \dots) e_2) e_1]\!\varepsilon \end{aligned}$$

## Sémantika rekursivních definic

Pro funkcionální jazyk s líným vyhodnocováním lze sémantiku rekursivních definic zavést takto:

$$\mathcal{M}[\mathbf{letrec} \ v_1 = e_1, \dots, v_n = e_n \ \mathbf{in} \ e]\varepsilon = \mathcal{M}[e]\varepsilon'$$

$$\text{kde } \varepsilon' = \bigsqcup_{j \geq 0} \varepsilon_j, \quad \varepsilon_0 = \varepsilon[v_1 \mapsto \perp, \dots, v_n \mapsto \perp]$$

a pro každé  $j \geq 0$  je  $\varepsilon_{j+1} = \varepsilon_j[v_1 \mapsto \mathcal{M}[e_1]\varepsilon_j, \dots, v_n \mapsto \mathcal{M}[e_n]\varepsilon_j]$ .

## Příklad

$$\mathcal{M}[\text{letrec } f = \lambda n. \text{ if } n == 0 \text{ then } 1 \text{ else } n * f(n - 1) \text{ in } f]_{\varepsilon_0} = \mathcal{M}[f]_{\varepsilon'}$$

		$\perp$	0	1	2	3	4	...
$\varepsilon_0 = [f \mapsto f_0]$	$f_0$	$\perp$	$\perp$	$\perp$	$\perp$	$\perp$	$\perp$	...
$\varepsilon_1 = [f \mapsto f_1]$	$f_1$	$\perp$	1	$\perp$	$\perp$	$\perp$	$\perp$	...
$\varepsilon_2 = [f \mapsto f_2]$	$f_2$	$\perp$	1	1	$\perp$	$\perp$	$\perp$	...
$\varepsilon_3 = [f \mapsto f_3]$	$f_3$	$\perp$	1	1	2	$\perp$	$\perp$	...
$\varepsilon_4 = [f \mapsto f_4]$	$f_4$	$\perp$	1	1	2	6	$\perp$	...
$\vdots$	$\vdots$							
$\varepsilon' = [f \mapsto \bigsqcup f_j]$								

## Poznámka

Sémantiku rekursivních definic lze vyjádřit také pomocí *kombinátoru pevného bodu*  $Y$ .  
Potom lze rekursivní definici  $v = e$  považovat za syntaktickou zkratku pro nerekursivní definici  $v = Y(\lambda v. e)$ .

Potom

$$\mathcal{M}[\![\text{letrec } v = e_1 \text{ in } e]\!]_{\varepsilon} = \mathcal{M}[\![\text{let } v = Y(\lambda v. e_1) \text{ in } e]\!]_{\varepsilon} = \mathcal{M}[\![ (\lambda v. e)(Y(\lambda v. e_1)) ]\!]_{\varepsilon}.$$

Platí  $Y f = \bigsqcup_{k \geq 0} f^k(\perp)$ , (kde  $Y = \mathcal{M}[\![Y]\!]_{\varepsilon}$ , pro libovolné  $\varepsilon$ ),

tedy  $Y(\lambda v. e) = \dots ((\lambda v. e)((\lambda v. e)((\lambda v. e)((\lambda v. e)((\lambda v. e)\perp)))) \dots$

Pomocí kombinátoru pevného bodu se sémantika rekursivních definic zavádí také u jazyků se striktním vyhodnocováním.

# Funkcionální jazyky

**LISP** (LISt Processing) – John McCarthy, konec 50. let

jednoduchá syntax, stejná pro data i algoritmy – homoikonický jazyk

není čistě funkcionální

netypovaný

dynamická viditelnost

dialekty: AutoLisp, eLisp, ...

**Scheme** netypovaný jazyk vycházející z Lispu, 80. léta

syntax podobná Lispu; statická viditelnost, striktní vyhodnocování, streamy

**ML** typovaný jazyk, konec 70. let, Edinburgh

striktní vyhodnocování

dialekty: CaML, OCaML

**Erlang** dynamicky typovaný jazyk se striktním vyhodnocováním  
konstrukce pro podporu paralelního vyhodnocování

**Hope, Clean, Orwell, Miranda** konec 80. let, vesměs líně vyhodnocované  
často používané ve výuce programování; čistě funkcionální

**Opal** 90. léta, čistě funkcionální, modulární, striktně vyhodnocovaný

**Haskell** čistě funkcionální, modulární, líně vyhodnocovaný  
čisté začlenění imperativních konstrukcí do referenčně transparentního jazyka  
pomocí monadických typů a operací

**Cayenne, Agda, Epigram** experimentální jazyky  
velmi silný (tedy nerozhodnutelný) typový systém

# Souběžné zpracování

**Multitasking** souběžné zpracování úloh na jednom počítači

- úlohy využívají různé prostředky (typicky pomalejší I/O zařízení)
- interleaving
- víceuživatelský režim
- systém správy paměti je přizpůsoben souběžnému zpracování více úloh (stránkování, swapping, ...)

**Distribuované zpracování** rozdělení úlohy na nezávislé podúlohy, méně komunikace

- výpočetní shluky
- globálně distribuované úlohy

**Mobilní výpočty** stěhování výpočtu po síti

## Víceprocesorové počítače

- několikaprocessorové (MIMD)
  - samostatné procesory
  - vícejádrové subprocessory sdílející některé prostředky (paměť cache)
- procesorová pole (SIMD)  
využití: např. grafické karty
- mnohaprocessorové (PRAM)  
systémy pro simulaci masivního paralelismu

## Vícepočítačové systémy

tzv. *shluky* (clusters) – skupiny počítačů propojené sítí (obvykle lokální a velmi rychlou)

- určené pro distribuované výpočty
- pro zvýšení spolehlivosti



## Interference a nezávislost

Procesy  $P$ ,  $Q$  jsou *nezávislé*, když jejich paralelní kompozice  $P \parallel Q$  je vnějšně deterministická. V opačném případě jde o procesy *interferující*.

Nezávislost procesů je obecně nerozhodnutelná.

Dostatečná podmínka nezávislosti: Jsou-li oblasti paměti, k nimž přistupují procesy  $P$ ,  $Q$ , disjunktní, a množiny dalších prostředků využívaných oběma procesy jsou také disjunktní, jsou procesy nezávislé.

Příklad interferujících procesů:

$$\{ v := 1 ; v := v + 1 \} \parallel \{ v := 0 ; v := 3 * v \}$$

Existuje 6 možných prolínání, každé s jinou finální hodnotou proměnné  $v$ : 0, 1, 2, 3, 4, 6.

Sémantiku paralelní kompozice interferujících procesů nelze popsat přímo pomocí sémantik jednotlivých procesů (sémantika paralelní kompozice není skladebná).

Příklad: Nechť  $\sigma$  je libovolný stav a označme:

$$P_1 = \{i := 1\}, \quad P_2 = \{i := 2\}, \quad P'_1 = \{i := 0; i := i + 1\}, \quad \sigma_k = \sigma[i \mapsto k].$$

Platí

$$\llbracket P_1 \rrbracket \sigma = \llbracket P'_1 \rrbracket \sigma = \{\sigma_1\}$$

ale

$$\llbracket P_1 \parallel P_2 \rrbracket \sigma = \{\sigma_1, \sigma_2\}$$

$$\llbracket P'_1 \parallel P_2 \rrbracket \sigma = \{\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3\}$$

Tedy

$$\llbracket P_1 \parallel P_2 \rrbracket \sigma \neq \llbracket P'_1 \parallel P_2 \rrbracket \sigma$$

Naopak pro *nezávislé* procesy  $P$ ,  $Q$  a každý stav  $\sigma$  platí jednoduše

$$\llbracket P \parallel Q \rrbracket \sigma = \{ \sigma[\tau, \rho] \mid \tau \in \llbracket P \rrbracket \sigma, \rho \in \llbracket Q \rrbracket \sigma \}$$

Od procesů se obvykle očekává, že budou kooperovat, tedy nemohou být nezávislé. Neřízená (živelná) interference je však nepraktická, protože neomezeně interferující procesy je extrémně těžké programovat, ladit a spravovat. (Může však mít smysl na hardwarové úrovni.)

Proto je vhodné interferenci omezit na přesně určená místa výpočtu a oblasti sdílené paměti.

## Podmíněná kritická sekce

Přepisovatelné proměnné sdílené procesy musí být jako takové deklarovány (**shared var**  $v$ ). Složený příkaz **region**  $v$  **do**  $P$  vymezuje kritickou sekci vzhledem ke sdílené proměnné  $v$ . Proces v kritické sekci může být pozastaven (a přístup ke sdílené proměnné uvolněn) na základě tzv. *await podmíněk*.

```
type MessageBuffer = record size, front, rear : 0..capacity;  
                        items : array 1..capacity of Mes  
                        end;  
shared var buffer : MessageBuffer;
```

```

procedure sendmes (newitem : Mes);
  begin region buffer do
    begin await buffer.size < capacity;
      buffer.size := buffer.size + 1;
      buffer.rear := buffer.rear mod capacity + 1;
      buffer.items[buffer.rear] := newitem
    end
  end;

procedure receivemes (out olditem : Mes);
  begin region buffer do
    begin await buffer.size > 0;
      buffer.size := buffer.size - 1;
      olditem := buffer.items[buffer.front];
      buffer.front := buffer.front mod capacity + 1
    end
  end

```

## Semafor

Semafor je globální objekt přístupný pouze pomocí metod

$seminit(s, i)$

$semwait(s)$

$semsignal(s)$

Skládá se ze tří číselných hodnot:

$i$  ... iniciální hodnota zadaná operací  $seminit(s, i)$

$w$  ... počet provedených operací  $semwait(s)$

$s$  ... počet provedených operací  $semsignal(s)$

Invariant:  $0 \leq w \leq s + i$ .

*Parent:*

```
seminit(nonempty, 0);  
seminit(nonfull, k)
```

*Sender:*

```
semwait(nonfull);  
send_data;  
semsignal(nonempty)
```

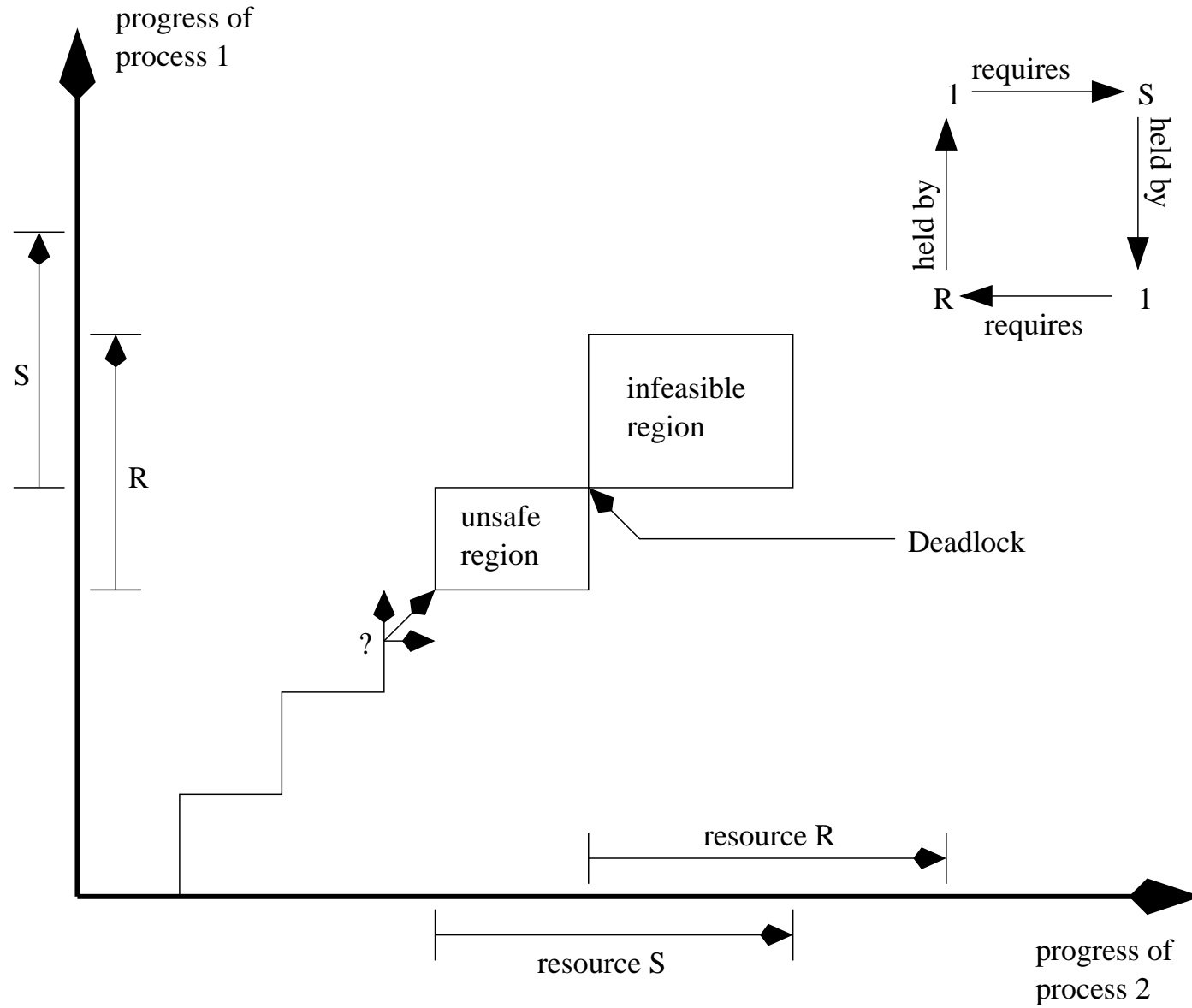
*Receiver:*

```
semwait(nonempty);  
receive_data;  
semsignal(nonfull)
```



## Problémy souběžného zpracování

- Nedeterminismus – při souběžném zpracování v mnohem větší míře než při sekvenčním; cílem je psát programy globálně (vnějšně) deterministické – chyby vzniklé porušením tohoto pravidla se obtížně detekují, protože běhy výpočtu jsou prakticky neopakovatelné.
- Závislost na relativní rychlosti zpracování.
- Zablokování – čekání procesů na sebe navzájem.
- Zmítání – „živá“ varianta zablokování (procesy tráví čas marnými pokusy na odstranění zablokování).
- Strádání – situace, kdy některé procesy „stojí“ (setrvávají ve stejném stavu) a ostatní běží na jejich úkor – je důsledkem tzv. nespravedlivého plánování.



## Zablokování (deadlock)

je stav, kdy množina procesů čeká na přístup k prostředkům a z důvodu vzájemně nekompatibilních požadavků tento přístup nezíská.

K zablokování může dojít, právě když platí současně následující podmínky:

- Vzájemné vyloučení – každý prostředek je přidělen nejvýše jednomu procesu.
- „Wait & hold“ – procesy čekající na prostředky si drží jiné dříve přidělené prostředky.
- Cyklické čekání – v bipartitním grafu procesů a prostředků s hranami „chce“ a „je přidělen“ je cyklus.

## Řešení zablokování

**Vyhýbání se zablokování** – sledováním, zda se výpočet nepřiblížil nebezpečné oblasti. Drahé.

**Prevence zrušením podmínky „wait & hold“** – vyžaduje se, aby každý proces požádal naráz o všechny prostředky, které bude potřebovat. Plýtvání prostředky.

**Prevence zrušením podmínky cyklického čekání** – na prostředcích se zavede lineární uspořádání a vyžaduje se, aby byly požadovány jen v tomto pořadí. Elegantní, ale někdy může být omezující.

**Detekce a zotavení** – rozpoznání, že došlo k deadlocku, a zabití procesu.

**Neřešení** – ignorování deadlocku. Zabití procesů je ponecháno na vlastníkovvi či vlastnících. Je-li zablokování v OS, zmrznutí a reboot.

„Živá“ varianta deadlocku – *livelock* (zmítání).

Algoritmus plánování přidělování prostředků procesům je *spravedlivý*, když zaručuje, že každý proces bude čekat na přístup k požadovaným prostředkům nejvýše konečně dlouho.