

IB015 Neimperativní programování

Jiří Barnat

Organizace kurzu

Kurz IB015

- Zakončen zkouškou.
- 6 kreditů ($2/1/1+z_k$) = 180 hodin = 22 pracovních dnů

Přednáška

- Přednáška ve formě výukových videí (offline).

Cvičení

- Se 14 denní periodou v určené časové sloty.
- Offline videa s demonstrací řešení vybraných příkladů.
- Individuální konzultace po chatu, případně video hovoru.

Samostatné domácí úlohy

- Zadávání v interaktivní osnově předmětu.

Závěrečná písemná zkouška - prezenčně

- Povinná část (Pass/Fail).
- Nepovinná část, možno získat 10 bodů.

Domácí úlohy

- Průběžné odpovědníky v ISu, časové omezení na vypracování.
- Minimálně tři větší programovací úlohy.
- Celkem možno získat 15 bodů.

Požadavky na úspěšné ukončení

- Povinná část písemky, minimálně 8 bodů z DÚ.
- Podle počtu bodů za DÚ a zkoušku:
E:[10,12) D:[12,14) C:[14,17) B:[17,20) A:[20,25]
- Při získání 12+ bodů z DÚ je možno při úspěšném ukončení předmětu odmazat jedno hodnocení F.

Cíle kurzu

- Studenti se seznámí s funkcionálním a logickým paradigmatem programování, díky čemuž se odprostí od imperativního způsobu uvažování o problémech a jejich řešení.
- V rámci kurzu se studenti blíže seznámí s funkcionálním programovacím jazykem Haskell a s logickým programovacím systémem Prolog.

Schopnosti absolventa

- Je schopen dekomponovat výpočetní problém na jednotlivé funkce a tuto schopnost používá při vytváření vlastních kódů i v imperativních programovacích jazycích.
- Umí efektivně použít prvky funkcionálního programování v imperativních programovacích jazycích.
- Má základní znalost programovacích jazyků Haskell a Prolog.
- Rozumí způsobu popisu programů ve funkcionálním a logickém výpočetním paradigmatu.
- Umí oddělit CO od JAK.

Předpoklady

- Možné úspěšně absolvovat bez znalosti programování.
- Schopnost abstraktního myšlení.
- Základní počítačová gramotnost (Unix/Linux OS).

Znalost imperativního programování

- Je výhodou pro pochopení rozdílného způsobu myšlení v imperativním a neimperativním světě.
- Může být zpočátku mentální bariérou.

Funkcionální paradigma

- <http://haskell.cz/>
- Thompson, Simon. Haskell: the craft of functional programming.
- Structure and Interpretation of Computer Programs
[<http://mitpress.mit.edu/sicp/full-text/book/book.html>]

Logické paradigma

- <http://www.learnprolognow.org>
- Nerode, Shore: Logic for Applications

Co znamená programovat?

Programování

- Vytvoření a zápis postupu řešení problému s takovou úrovní detailů a přesnosti, aby tento popis mohl být mechanicky vykonáván strojem, zejména počítačem.
- Zápis postupu = zdrojový kód programu.
- Zdrojový kód programu je uložen v textovém souboru.

Programovací jazyk

- Uměle vytvořený jazyk pro přesný a jednoznačný zápis programů člověkem.

Schopnost programovat

- **Mentální schopnost nacházet mechanicky proveditelné postupy za účelem řešení daného problému.**
- Schopnost přesně formulovat postupy v daném programovacím jazyce.

Volba a znalost programovacího jazyka

- Programovacích jazyků je mnoho.
- Volba programovacího jazyka klade omezení na způsob formulace zamýšlených postupů.

Riziko a klam moderní doby

- Dokumentace k programovacím jazykům jsou snadno dostupné i ve formě tutoriálů, avšak samotné poznání syntaxe a sémantiky programovacího jazyka nedělá dokonalého programátora.

Riziko a klam moderní doby

- Dokumentace k programovacím jazykům jsou snadno dostupné i ve formě tutoriálů, avšak samotné poznání syntaxe a sémantiky programovacího jazyka nedělá dokonalého programátora.

Nedokonalé vs. dokonalé

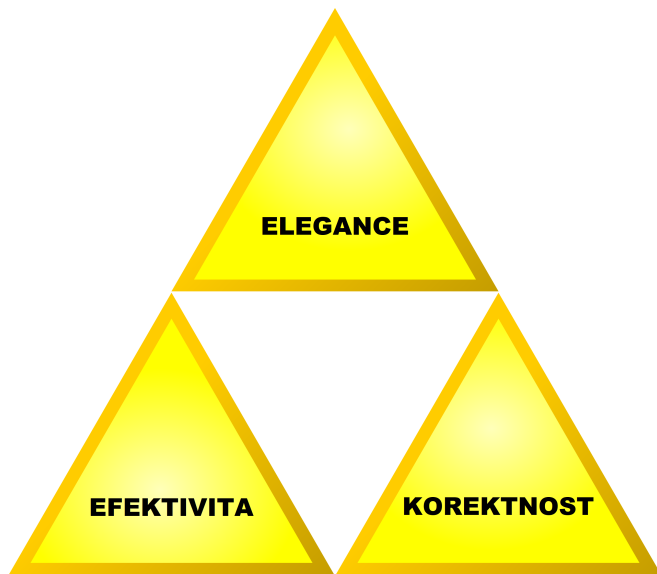


Riziko a klam moderní doby

- Dokumentace k programovacím jazykům jsou snadno dostupné i ve formě tutoriálů, avšak samotné poznání syntaxe a sémantiky programovacího jazyka nedělá dokonalého programátora.

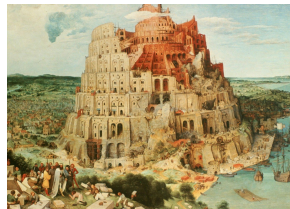
Nedokonalé vs. dokonalé





Klasifikace

- Imperativní — C/C++, Java, Python, ...
- Funkcionální – **Haskell**, OCaml, ...
- Logické – **Prolog**, ...



Jakým jazykem mluví počítač?

- Strojový kód. Program ve strojovém kódu je posloupnost čísel.
- Pro spuštění programu je potřeba provést překlad zdrojového kódu programu do strojového kódu procesoru.
- Překlad se realizuje pomocí **překladače** nebo **interpretu**.
- Pro každý programovací jazyk je potřeba jiný překladač/interpret.

Překladač

- Pro soubor se zdrojovým kódem programu vytvoří soubor obsahující popis programu ve strojovém kódu.
- Výsledný soubor je spustitelný.
- Pracuje se soubory.

Interpret

- Pro daný výraz / příkaz vytvoří odpovídající překlad do strojového kódu a ihned jej provede.
- Nevytváří výsledný spustitelný soubor.
- Často má možnost pracovat interaktivně.
- Pracuje s jednotlivými příkazy/výrazy.

Programovací jazyk Haskell

- Překladač – ghc.
- Interaktivní interpret – ghci.
- Neinteraktivní interpretace – runghc.

Překladače programovacího jazyka C/C++

- GNU C++ Compiler (g++, gcc)
- Intel C++ Compiler
- Microsoft Visual C++ Compiler

Programujeme pomocí funkcí

Funkce v programování

- Funkce je předpis jak z nějakého vstupu vytvořit výstup.
- Transformace vstupů na výstupy musí být jednoznačná.

Příklady funkcí

- $f(x) = x*(x+2)$
- objemkvadru $a b c = a*b*c$
- ...

Typ funkce

- Vymezení objektů, se kterými daná funkce pracuje a které vrací na výstup, je součástí definice funkce. Mluvíme o tzv. **typu funkce**.

Příklady

- Funkce, která otočí obrázek o 90 stupňů směrem vpravo.
`rotate90r :: Obrázek -> Obrázek`
- Objem kváдру.
`objemkvadru :: Číslo × Číslo × Číslo -> Číslo`
- Počet hran polygonu.
`hranypolygonu :: Polygon -> Celé_číslo`

Předpoklady

`rotate90r :: Obrázek -> Obrázek`

`hranypolygonu :: Obrázek -> Celé_číslo`

`△ :: Obrázek`

Aplikace funkcí

`rotate90r △` \rightsquigarrow 

`hranypolygonu △` \rightsquigarrow 3

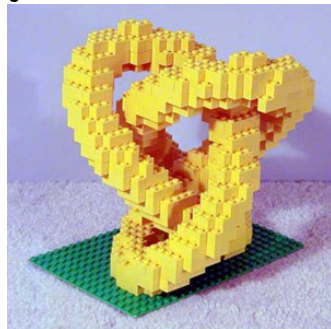
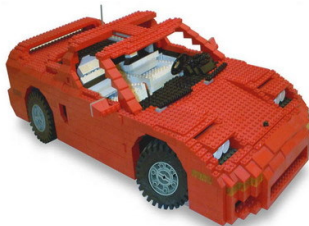
Pozorování

- Složitější úkony lze realizovat pomocí jednodušších operací.
- Složitější funkce lze definovat **složením** jednodušších.

Pozorování

- Složitější úkony lze realizovat pomocí jednodušších operací.
- Složitější funkce lze definovat **složením** jednodušších.

Skládání – cesta ke složitějším objektům a funkcím



Operátor .

- $(f1 . f2) x = f1 (f2 x)$
- Čteme jako „f1 po f2“.

Příklad

- Předpokládejme funkci `double`, která vezme obrázek a vytvoří nový zkopírováním vloženého obrázku dvakrát vedle sebe.



`double :: Obrázek -> Obrázek`


`double`  \rightsquigarrow 


- Novou funkci `rotate_and_double` můžeme definovat takto:


`rotate_and_double :: Obrázek -> Obrázek`



`rotate_and_double x = (double . rotate90r) x`


`rotate_and_double`  \rightsquigarrow 


`(rotate_and_double . rotate_and_double)`  \rightsquigarrow



`((double . double) . double)`  \rightsquigarrow

`(double . hranypolygonu)`  \rightsquigarrow


`(rotate_and_double . rotate_and_double)`  \rightsquigarrow 



`((double . double) . double)`  \rightsquigarrow

`(double . hranypolygonu)`  \rightsquigarrow


`(rotate_and_double . rotate_and_double)`  \rightsquigarrow 


`((double . double) . double)`  \rightsquigarrow 

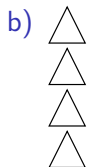
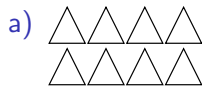
`(double . hranypolygonu)`  \rightsquigarrow

`(rotate_and_double . rotate_and_double)`  \rightsquigarrow 

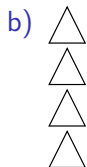
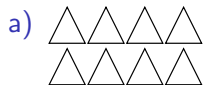
`((double . double) . double)`  \rightsquigarrow 

`(double . hranypolygonu)`  \rightsquigarrow **ERROR**

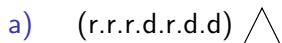
Jak pomocí `double`, `rotate90r` a  vyrobít následující?



Jak pomocí `double`, `rotate90r` a \triangle vyrobit následující?



Řešení



Složené funkce a η -redukce

- Složení funkcí je možné definovat bez uvedení parametru.
- Tj. definici

```
rotate_and_double x = (double.rotate90r) x
```

lze zapsat také jako

```
rotate_and_double = double.rotate90r
```

POZOR na prioritu vyhodnocování v Haskellu

- Aplikace funkce na parametry má nejvyšší prioritu.

```
double.rotate90r  $\triangle$  = double.(rotate90r  $\triangle$ )  $\rightsquigarrow$  ERROR
```

- Závorky kolem výrazu `double.rotate90r` jsou při aplikaci na hodnotu \triangle nutné.

Typová signatura:

`rotate_and_double :: Obrázek ->Obrázek`

Jméno funkce

`rotate_and_double` x = (double.rotate) x

Tělo funkce

`rotate_and_double` x = `(double.rotate)` x

Definice funkce

`rotate_and_double` x = `(double.rotate)` x

Formální parametr

rotate_and_double x = (double.rotate) x

Aktuální parametr

rotate_and_double △

Výraz

rotate_and_double △

Podvýraz

rotate_and_double (rotate_and_double △)

Funkcionální programování v Haskellu

Funkcionální výpočetní paradigma

- program = výraz + definice funkcí
- výpočet = úprava (zjednodušení) výrazu
- výsledek = hodnota (nezjednodušitelný tvar výrazu)

Příklad programu

- definice funkcí

```
square x = x * x
```

```
pyth a b = square a + square b
```

- výraz

```
pyth 3 4
```

Program

- definice funkcí

```
square x = x * x
```

```
pyth a b = square a + square b
```

- výraz

```
pyth 3 4
```

Výpočet

$$\begin{aligned} \underline{\text{pyth } 3 \ 4} &\rightsquigarrow \underline{\text{square } 3} + \text{square } 4 \rightsquigarrow 3 * 3 + \underline{\text{square } 4} \rightsquigarrow \\ &\rightsquigarrow \underline{3 * 3} + 4 * 4 \rightsquigarrow 9 + \underline{4 * 4} \rightsquigarrow \underline{9 + 16} \rightsquigarrow \\ &\rightsquigarrow 25 \end{aligned}$$

Lokální definice

- Definují symboly (funkce, konstanty) pro použití v jednom výrazu, vně tohoto výrazu jsou tyto symboly nedefinované.
- Lokální definice mají vyšší prioritu než globální definice.

V Haskellu pomocí let ... in

- let definice in výraz

```
let fcube x = x * x * x in fcube 12
```

```
let fcube x = x * x * x in let c = 12 in fcube c
```

```
let fcube x = x * x * x; c = 12 in fcube c
```

Čísla

- `Integer` – libovolně velká celá čísla
- `Int` – celá čísla do velikosti slova procesoru
- `Float` – reálná čísla
- `Rational` – racionální čísla

Znaky a řetězce

- `Char` – znak, příklady hodnot: `'a'`, `'2'`, `'>'`
- `String` – řetězec, například: `"Toto je řetězec."`
- `String` je totéž co `[Char]`

Pravdivostní hodnoty

- `Bool`
- Typ `Bool` má pouze 2 hodnoty: `True` a `False`

Příklad

- Definujte funkci `jedna_nebo_dva`, která vrátí `True` pokud dostane na vstupu číslo 1 nebo 2, jinak vrátí `False`.

```
jedna_nebo_dva :: Integer -> Bool
jedna_nebo_dva 1 = True
jedna_nebo_dva 2 = True
jedna_nebo_dva _ = False
```

Víceřádkové definice funkcí

- Na místě formálních parametrů se použijí tzv. vzory.
- Použije se první vzor, který vyhovuje, nic jiného.
- Symbol `_` vyhovuje libovolnému parametru.
- Lze použít pro větvení výpočtu.

Podmíněný výraz

- if *podmínka* then *výraz1* else *výraz2*
- *podmínka* – výraz, který se vyhodnotí na hodnotu typu `Bool`
- *výraz1* se vyhodnotí pokud se podmínka vyhodnotí na hodnotu `True`, *výraz2* se vyhodnotí, pokud se podmínka vyhodnotí na hodnotu `False`.
- Výrazy *výraz1* a *výraz2* musejí být stejného typu.

Test na rovnost

- Pro dotaz na rovnost používáme symbol `==`.
- `3 == 4` \rightsquigarrow `False`
- `3 = 4` \rightsquigarrow **Error**

Možnosti zápisu binárních funkcí

- Infixový zápis binárních funkcí: $3+4$, $4*5$
- Prefixový zápis binárních funkcí: $(+) 3 4$, $(*) 4 5$

Volání funkce a parametry

- Jméno funkce a použité parametry jsou odděleny mezerou, pokud je některý z parametrů výraz, který je sám o sobě aplikace funkce na argumenty, je třeba celý tento výraz ozávkovat.
- $(*) 3 4 + 5 \rightsquigarrow 17$
- $(*) 3 + 4 5 \rightsquigarrow$ **Error**
- $(*) 3 (+) 4 5 \rightsquigarrow$ **Error**
- $(*) 3 ((+) 4 5) \rightsquigarrow 27$

Zde byla ukázka jednoduchého programu v Haskellu, který bylo možné přeložit do spustitelného programu a spustit.

Na základě zkušeností a četných žádostí cvičících byl tento příklad z první přednášky odstraněn.

Co to je?

- Úkol, který je možné vyřešit na základě faktů doposud uvedených na přednáškách.
- Slouží ke kontrole, že zvládám to, co bych už měl(a) umět.

Checkpoint

- V programovacím jazyce Haskell napište funkci, která bude řešit dělitelnost dvou celočíselných čísel, tj. pro své dva celočíselné argumenty dělenec a dělitele, rozhodne, zda je zadaný dělenec dělitelný beze zbytku zadaným dělitelem a to tak, že nepoužije operace pro dělení / ani počítání zbytku po dělení `mod`, je povoleno použít operaci celočíselného dělení `div`.
- Funkci otestujte s použitím interpretu jazyka Haskell.

IB015 Neimperativní programování

Programování a data

Jiří Barnat
Libor Škarvada

Pozorování

- Programy pro své fungování potřebují různé informace – **data**.
- Data jsou vstupní hodnoty, výstupní hodnoty, mezivýsledky výpočtů, parametry funkcí, atd.

Programování a data

- Data je třeba uchovávat tak, aby je bylo možné zpracovat mechanicky/strojově.
- Tvorba jednoznačného popisu struktury a **způsobu uložení dat je nedílná součást procesu programování.**

Dekompozice dat

- Veškerá data použitá v programu je třeba vystavět ze základních datových elementů podle definovaných pravidel.
- Existují striktní pravidla pro dekompozici dat, my si však v rámci IB015 vystačíme s intuicí.

Základní datové elementy

- Čísla, Znaky, Pravdivostní hodnoty

Základní způsoby kompozice dat

- **Uspořádané n-tice**
- **Seznamy**

Co to je

- Pevně daný počet nějakých hodnot v pevně daném pořadí.
- Prvek kartézského součinu nosných množin.

Příklady

- Datum: (11, "březen", 1977) .
- Přihlašovací údaje: ("xbarnat", "majen10cm")
- Pozice pixelu v rastrovém obrázku: (x, y) , všimněme si, že (12,43) \neq (43,12) .

Kdy se má použít

- **Počet prvků v n-tici je znám předem**, tj. v okamžiku psaní zdrojového kódu.
- Počet prvků v n-tici je malý (hodnota n je malá).

Co to je

- Posloupnost hodnot stejného charakteru (stejného typu).
- Posloupnost může být prázdná, konečná i nekonečná.
- Každý prvek v seznamu je na nějaké (unikátní) pozici.

Příklady

- Seznam čísel: [12,43,-3,15,29]
- Nekonečný seznam přirozených čísel: [1,2..]
- Seznam uspořádaných dvojic:
[("Fero",12), ("Nero",7), ("Pero",5)]
- Prázdný seznam: []

Kdy se má použít

- **Data vznikají nebo se zpracovávají postupně.**
- Počet prvků použitých programem není předem znám.

Aplikace – Diář squashových partnerů.

- Program pro správu kontaktů na různé squashové hráče.
- Hlavní datová struktura je seznam kontaktů.

Datová dekompozice

- Seznam kontaktů
[kontakt1, kontakt2, kontakt3, ..., kontakt315]
- Kontakt je uspořádaná trojice
(Prezdivka, Telefon, Adresa)
- Adresa je uspořádaná pětice
(Jmeno, Prijmeni, Ulice, Cislo Popisne, Mesto)
- Prezdivka, Jmeno, Prijmeno, Ulice, Mesto jsou seznamy znaků
- Telefon, Cislo Popisne jsou čísla

Hodnoty a Typy



Co je to typ

- Označení množiny všech hodnot dané kvality.
- Komunikační prostředek napomáhající správnému skládání programů z jednotlivých funkcí.

K čemu se používají typy

- Každá hodnota, nebo výraz má svůj typ.
- Definice typové signatury funkcí.
- Kontrola logické konzistence programu v době překladu.
- Popis způsobu kompozice složených datových struktur.
(Typy se komponují stejně jako data.)

Základní datové typy

- `Int`, `Integer`, `Float`, `Char`, `Bool`

Složené typy

- Uspořádané n-tice:

`(Bool, Int)`

- Seznamy:

`[Int]`, `[Char]`, `[[Char]]`

`[Char] ≡ String`

Funkcionální typy

- `Integer -> Bool`, `Float -> Float -> Float`

Konstrukce

- Jsou-li σ a τ nějaké typy, tak $\sigma \rightarrow \tau$ je typ všech funkcí s parametrem typu σ a funkční hodnotou typu τ .

Typ n-árních funkcí

- Jsou-li $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3 \dots \sigma_n$ a τ nějaké typy, tak

$$\sigma_1 \rightarrow \sigma_2 \rightarrow \sigma_3 \rightarrow \dots \rightarrow \sigma_n \rightarrow \tau$$

je typ všech funkcí s prvním parametrem typu σ_1 , druhým parametrem typu σ_2 , ... a funkční hodnotou typu τ .

Terminologie

- **Arita funkce** označuje počet parametrů funkce.
- Konstanty, unární, binární, ternární funkce.
- Nulární funkce ($n=0$) jsou konstanty daného typu.

Pozorování

- Typ výrazu, který je úplná aplikace funkce na parametry, lze odvodit z typu použité funkce **bez nutnosti výpočtu výsledné hodnoty**.

Příklad

```
odd :: Integer -> Bool
27  :: Integer
odd 27 :: Bool
```


Pozorování

- Některé funkce nepotřebují znát konkrétní typy formálních parametrů, pouze jejich strukturu.
- Místo konkrétního typu se použije **typová proměnná**.
- Při aplikaci funkce na konkrétní parametry, se za typovou proměnnou dosadí typ, který odpovídá použitému parametru. (Typová proměnná se specializuje.)
- **POZOR! Typová proměnná zastupuje i složené typy.**

Příklad

```
fst :: (a,b) -> a
(not, "Coze?") :: (Bool -> Bool, [Char])
fst (not , "Coze?") :: Bool -> Bool
```

Pozorování

- Některé funkce nevyžadují konkrétní typ, ale zároveň nedovolují použití libovolného typu, proto je třeba specializaci typové proměnné omezit na vybranou podtřídu typů.

Základní typové třídy

- `Integral` – celočíselné
- `Num` – numerické
- `Ord` – uspořadatelné
- `Eq` – porovnatelné na rovnost

Příklady typů s omezením specializace typové proměnné

```
odd :: Integral a => a -> Bool
```

```
(+) :: Num a => a -> a -> a
```

Typ není váš nepřítel

Typ není váš nepřítel



Uspořádané n-tice a seznamy v Haskellu

Zápis uspořádaných n-tic

- Přirozený, pomocí závorek a čárek.
- Příklady zápisu uspořádaných n-tic v Haskellu:

`(12,15)`

`(2,3,'a',5,6)`

`("Fiii","jo", 350, "tisíc", '!')`

`((1,1),(2,2),(3,3))`

Krajní případy

- Jednotice se nepoužívají.
- Nultice: `()`

Hodnotové konstruktory

- $(, , \dots ,)$ – hodnotový konstruktore uspořádané n-tice
- $(,)$ – hodnotový konstruktore uspořádané dvojice

$$(,) :: a \rightarrow b \rightarrow (a, b)$$
$$(,) x y = (x, y)$$

Projekce

- `fst` , `snd` – projekce na první a druhou složku

$$\text{fst} :: (a, b) \rightarrow a$$
$$\text{fst } (x, y) = x$$
$$\text{snd} :: (a, b) \rightarrow b$$
$$\text{snd } (x, y) = y$$

Zápis seznamů

- V hranatých závorkách uzavřená posloupnost prvků oddělených čárkou.
- Seznam znaků též jako řetězec (text v uvozovkách).

Příklady

```
[3,3,3,3]
```

```
[ [1], [1,2], [1,2,3] ]
```

```
[]
```

```
"ahoj" = ['a','h','o','j']
```

```
"toto je také seznam"
```

```
[ or, or, or, and ]
```


Hodnotové konstruktory

- Prázdný seznam: `[]`
`[] :: [a]`
- Operátor připojení prvku na začátek seznamu: `(:)`
`(:) :: a -> [a] -> [a]`

Příklady

- Správné použití
`(:) 3 [3,3,3] ~> [3,3,3,3]`
`1:2:3:[] ~> [1,2,3]`
`4:[4,4,4,4] ~> [4,4,4,4,4]`
`'A':"hoj" ~> "Ahoj"`
- Nesprávné použití
`[2] : [3,4,5] ~> ERROR`
`[2,3,4] : 5 ~> ERROR`
`'A' : [1,2,3] ~> ERROR`

Úkol

- Jaké je implicitní ozávkování v následujícím výrazu a proč je takové, jaké je?

1:2:3:4:5: []

Řešení

Úkol

- Jaké je implicitní ozávkování v následujícím výrazu a proč je takové, jaké je?

1:2:3:4:5: []

Řešení

- 1:(2:(3:(4:(5: []))))
- Jiné ozávkování není možné, nevyhovělo by typové signatuře hodnotového konstrukturu (:).
- Dvojtečka nejvíce vlevo je **nejvnějšnější**.

Funkce pro spojení seznamů

- Seznamy **stejného typu** lze spojit pomocí funkce `(++)`
`(++) :: [a] -> [a] -> [a]`

Příklady

- Správné použití

`(++) "Ahoj " "světe!" ~> "Ahoj světe!"`

`"Ahoj" ++ " " ++ "světe!" ~> "Ahoj světe!"`

`[1,2,3] ++ [4,5,6] ~> [1,2,3,4,5,6]`

- Nesprávné použití

`2 ++ [3,4,5] ~> ERROR`

`[2,3,4] ++ 5 ~> ERROR`

`[2,3] ++ "text" ~> ERROR`

Hodnotové konstruktory ve víceřádkových definicích

- Fungují jako vzory na levých stranách definice.
- Mapují se vždy na **nejvnějšnější** výskyt.

Příklady

- Funkce `null` aplikovaná na nějaký seznam, vrací `True` pokud je seznam prázdný a `False` pokud je neprázdný.

```
null :: [a] -> Bool
null (_:_) = False
null [] = True
```

- Funkce `snd` aplikovaná na uspořádanou dvojici, vrací druhý prvek dvojice.

```
snd :: (a,b) -> b
snd (_,y) = y
```

Použití symbolu @

- Pokud `vzor` je korektně vytvořený datový vzor, pak zápisem `jmeno@vzor` získáme proměnnou `jmeno`, která bude po úspěšném použití vzoru odkazovat na celý mapovaný obsah.
- Nejčastěji používané ve spojení se seznamy, ale funguje všeobecně pro jakékoliv hodnoty konstruované s využitím hodnotových konstruktorů.

Příklady

- Při mapování seznamu `[1,2,3]` na vzor `a@(x:t)`, bude
 $a = [1,2,3], \quad x = 1, \quad t = [2,3]$.
- $f(a@(x:y)) = x:a++y$
 $f [1,2,3] \rightsquigarrow^* [1,1,2,3,2,3]$
 $f [] \rightsquigarrow^* \mathbf{ERROR}$

Úkoly

- Napište funkci, která vrátí druhý prvek seznamu, pokud je aplikována na seznam délky alespoň dva.

IB015 Neimperativní programování

Funkce na seznamech a Rekurze

Jiří Barnat
Libor Škarvada

Vím, že programovat znamená především přemýšlet ...

- o správném **postupu**, jak dojít k cíli,
- o **dekompozici** řešeného problému.

Vím, že k obému mi pomáhá především ...

- najít vhodný způsob **uložení dat**,
- správné **otypování použitých artefaktů**.

Kudy dál?

- Musím se seznámit se základními stavebními kameny programovacího jazyka a naučit se je správně, efektivně a elegantně používat (Triforce).

Práce se seznamy v Haskellu (poprvé)

První prvek seznamu

- `head :: [a] -> a`

Seznam bez prvního prvku

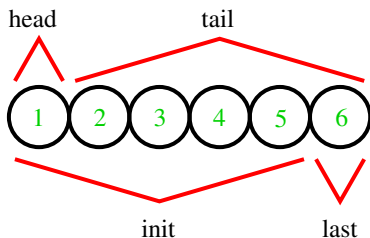
- `tail :: [a] -> [a]`

Poslední prvek seznamu

- `last :: [a] -> a`

Seznam bez posledního prvku

- `init :: [a] -> [a]`



Z minula známe

- (:), (++)

Úkol 1

- Zdvojte první prvek seznamu.
- Zduplikujte seznam a na konec přidejte první prvek.

Úkol 2

- Prohodte první dva prvky seznamu.
- Prohodte první a poslední prvek seznamu.

Zjištění počtu prvků v seznamu

- Vrací počet prvků v seznamu na nejvyšší úrovni, tj. nepočítá prvky v zanořených seznamech!
- `length :: [a] -> Int`

Vyzkoušejte

- `length [5,2,8] ~> 3`
`length [] ~> 0`
`length [[]] ~> 1`
`length [[3],[8,4,5,5,5,4,5]] ~> 2`

Prvních n prvků seznamu

- Vrátí prvních n prvků seznamu jako seznam
- `take :: Int -> [a] -> [a]`

Seznam bez prvních n prvků seznamu

- Vrátí původní seznam bez prvních n prvků
- `drop :: Int -> [a] -> [a]`

Získání n-tého prvku

- Vrátí prvek seznamu na dané pozici, první prvek je na pozici 0.
- `(!!) :: [a] -> Int -> a`

Seznam prvků v opačném pořadí

- `reverse :: [a] -> [a]`

Aritmetické a logické funkce na seznamech

- `minimum :: Ord a => [a] -> a`
- `maximum :: Ord a [a] -> a`
- `sum :: Num a => [a] -> a`
- `product :: Num a => [a] -> a`
- `or :: [Bool] -> Bool`
- `and :: [Bool] -> Bool`

Srovnejte s binárními funkcemi

- `min :: Ord a => a -> a -> a`
- `max :: Ord a => a -> a -> a`
- `(&&) :: Bool -> Bool -> Bool`
- `(||) :: Bool -> Bool -> Bool`

Úkol 3

- Rozhodněte, zda je seznam palindrom.

Úkol 4

- Na neprázdných seznamech typu `Num a => [a]` definujte funkci, která rozhodne, zda je součet prvků seznamu větší, než součin.

Aplikace funkce na prvky v seznamu

- `map :: (a -> b) -> [a] -> [b]`

Vyzkoušejte

- `map not [True,False,False]` \rightsquigarrow^* `[False,True,True]`
- `let f x = x + 1 in map f [4,5,6]` \rightsquigarrow^* `[5,6,7]`
- `map even [3,4,5]` \rightsquigarrow^* `[False,True,False]`

Výběr prvků seznamu podle dané podmínky

- `filter :: (a -> Bool) -> [a] -> [a]`

Vyzkoušejte

- `filter odd [1,2,3]` \rightsquigarrow^* `[1,3]`
`filter (not.odd) [1,2,3]` \rightsquigarrow^* `[2]`

Všimněte si

- Funkce `map` i `filter` berou jako své argumenty jiné funkce. Takovým funkcím říkáme funkce vyšších řádů.

Úkol 5

- Rozhodněte, zda je seznam typu `Integral a => [a]` tvořen pouze sudými čísly.

Úkol 6

- Definujte funkci, která vrátí délku zadaného seznamu, tak, abyste nepoužili funkci `length`.

Úkol 7

- Pro seznam dvojic, zaměňte první složku každé dvojice za druhou a naopak. Funkci definujte s použitím klíčového slova `where`.
- Poznámka: `where` se podobně jako `let ... in` používá pro lokální definice s tím, že klauzule `where` se vyskytuje až za hlavním výrazem.

Ponechání/odstranění podmínkou definovaného prefixu

- První prvek od začátku seznamu nevyhovující zadané podmínce definuje místo, kde končí vracený, nebo zahozený prefix.
- `takeWhile :: (a -> Bool) -> [a] -> [a]`
`dropWhile :: (a -> Bool) -> [a] -> [a]`

Vyzkoušejte

- `takeWhile odd [1,3,5,6,7,8,9]` \rightsquigarrow^* `[1,3,5]`
`dropWhile odd [1,3,5,6,7,8,9]` \rightsquigarrow^* `[6,7,8,9]`

Spojení seznamu seznamů do jednoho seznamu

- `concat :: [[a]] -> [a]`

Spojení dvou seznamů do seznamu dvojic

- `zip :: [a] -> [b] -> [(a,b)]`
- Délka výsledného seznamu je definována kratším ze dvou zadaných seznamů.

Vyzkoušejte

- `concat [[1,2], [2,3], [3,4]]` \rightsquigarrow^* `[1,2,2,3,3,4]`
- `zip [1,2,3,4] "abc"` \rightsquigarrow^* `[(1, 'a'), (2, 'b'), (3, 'c')]`

Spojení seznamu pomocí funkce

- `zipWith :: (a -> b -> c) -> [a] -> [b] -> [c]`

Vyzkoušejte

- `zipWith (+) [1,2,3] [1,2,3,4,5]` \rightsquigarrow^* `[2,4,6]`
- `zipWith take [1,2,3] ["aaa","bbb","ccc"]`
 \rightsquigarrow^* `["a","bb","ccc"]`

Úkol

- Co počítá funkce `fn` a jakého je typu?
- ```
fn s = and (map f (zip s (head s:s)))
 where f (a,b) = a >= b
```

## Řešení

## Úkol

- Co počítá funkce `fn` a jakého je typu?
- ```
fn s = and (map f (zip s (head s:s)))  
  where f (a,b) = a >= b
```

Řešení

- `fn :: Ord a => [a] -> Bool`
- Funkce `fn` pro zadaný seznam rozhodne, zda je seznam neklesající.

Zadání

- S využitím stávajících znalostí o programovacím jazyce Haskell naprogramujte funkci `len`, která spočítá délku seznamu, a to tak, aniž byste použili funkci `length`, `sum` či jinou podobnou funkci.

Náznak řešení

- `len [] = 0`
`len (_:[]) = 1`
`len (_:_:[]) = 2`
`len (_:_:_:[]) = 3`
`len (_:_:_:_:[]) = 4`
...

Rekurze

Co je to rekurze

- Definice funkce, nebo datové struktury, s využitím sebe sama.

Význam v programování

- Umožňuje konečně dlouhý zápis definice funkce, která je definována pro nekonečně mnoho strukturálně odlišných parametrů.

Příklad

- Funkci `length`, která při aplikaci na seznam vrátí jeho délku, je nutné definovat rekurzivně.

```
length :: [a] -> Int
length [] = 0
length (_:s) = 1 + length s
```

Příklad výpočtu rekurzivní definice

```
length :: [a] -> Int
length [] = 0
length (_:s) = 1 + length s
```

```
length [6,7,8,9]  ~> 1 + length [7,8,9]
                  ~> 1 + ( 1 + length [8,9] )
                  ~> 1 + ( 1 + ( 1 + length [9] ) )
                  ~> 1 + ( 1 + ( 1 + ( 1 + length [] ) ) )

                  ~> 1 + ( 1 + ( 1 + ( 1 + 0 ) ) )
                  ~> 1 + ( 1 + ( 1 + 1 ) )
                  ~> 1 + ( 1 + 2 )
                  ~> 1 + 3
                  ~> 4
```

Rekurze na číselných funkcích

```
factorial :: Integer -> Integer
```

```
factorial 0 = 1
```

```
factorial x = x * factorial (x-1)
```

```
factorial 4 ~> 4 * factorial (4-1)  
~> 4 * factorial (3)  
~> 4 * ( 3 * factorial (3-1))  
~> 4 * ( 3 * factorial (2))  
~> 4 * ( 3 * ( 2 * factorial (2-1)))  
~> 4 * ( 3 * ( 2 * factorial (1)))  
~> 4 * ( 3 * ( 2 * ( 1 * factorial (0))))  
~> 4 * ( 3 * ( 2 * ( 1 * 1 )))  
~> 4 * ( 3 * ( 2 * 1 ))  
~> 4 * ( 3 * 2 )  
~> 4 * 6  
~> 24
```

Práce se seznamy v Haskellu (podruhé)

head, tail, init, last

První prvek seznamu

```
head :: [a] -> a
```

```
head (x:_) = x
```

Seznam bez prvního prvku

```
tail :: [a] -> [a]
```

```
tail (_:s) = s
```

Poslední prvek seznamu

```
last :: [a] -> a
```

```
last (x:[]) = x
```

```
last (_:s) = last s
```

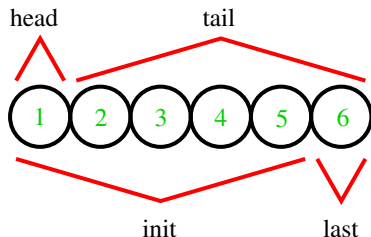
Seznam bez posledního prvku

```
init :: [a] -> [a]
```

```
init (_:[]) = []
```

```
init (x:_:[]) = [x]
```

```
init (x:s) = x:init s
```



Test na prázdný seznam

```
null :: [a] -> Bool  
null (_:_) = False  
null [] = True
```

Délka seznamu

```
length :: [a] -> Int  
length [] = 0  
length (_:s) = 1 + length s
```

N-tý prvek seznamu

```
(!!) :: [a] -> Int -> a  
(x:_) !! 0 = x  
(_:s) !! k = s !! (k-1)
```


Prvních n prvků seznamu

```
take :: Int -> [a] -> [a]
```

```
take _ [] = []
```

```
take n (x:s) = if (n>0) then x : take (n-1) s  
              else []
```

Seznam bez prvních n prvků;

```
drop :: Int -> [a] -> [a]
```

```
drop _ [] = []
```

```
drop n (x:s) = if (n>0) then drop (n-1) s  
              else (x:s)
```

Poznámka

- Při infixovém použití binární funkce klesá její priorita!

$x : \text{take } (n-1) s = x : (\text{take } (n-1) s)$

Spojení seznamů v seznamu

```
concat :: [[a]] -> [a]
concat [] = []
concat (x:s) = x ++ concat s
```

Vynechání prvků nesplňujících danou podmínku

```
filter :: (a -> Bool) -> [a] -> [a]
filter _ [] = []
filter f (x:s) = if (f x) then x : filter f s
                else filter f s
```

Vytvoření seznamu n-násobným kopírováním daného prvku

```
replicate :: Int -> a -> [a]
replicate 0 _ = []
replicate k x = x : replicate (k-1) x
```

Vynechání prvků seznamu od prvního, který nespĺňuje podmínku

```
takeWhile :: (a->Bool) -> [a] -> [a]
takeWhile _ [] = []
takeWhile p (x:s) = if (p x) then x : takeWhile p s
                    else []
```

Vynechání prvků seznamu po první, který nespĺňuje podmínku

```
dropWhile :: (a->Bool) -> [a] -> [a]
dropWhile _ [] = []
dropWhile p (x:s) = if (p x) then dropWhile p s
                    else x:s
```

Aplikace funkce na všechny prvky seznamu

```
map :: (a -> b) -> [a] -> [b]
map _ [] = []
map f (x:s) = f x : map f s
```

Spojení dvou seznamů do seznamu uspořádaných dvojic

```
zip :: [a] -> [b] -> [(a,b)]
```

```
zip [] _ = []
```

```
zip _ [] = []
```

```
zip (x:s) (y:t) = (x,y) : zip s t
```

Rozdělení seznamu dvojic na dvojici seznamů

```
unzip :: [(a,b)] -> ([a],[b])
```

```
unzip [] = ([],[])
```

```
unzip ((x,y):s) = (x : fst t, y : snd t) where t = unzip s
```

Výpočet aplikace binární funkce na seznamy argumentů

```
zipWith :: (a->b->c)->[a]->[b]->[c]
```

```
zipWith _ _ [] = []
```

```
zipWith _ [] _ = []
```

```
zipWith f (x:s) (y:t) = f x y : zipWith f s t
```

Pozorování

```
zip = zipWith (,)
```

**Demonstrace řešení vybraných příkladů
(mentálně náročné)**

Kolikátá mocnina dvojky

- Napište funkci, která zjistí, kolikrát se vyskytuje dvojka v prvočíselném rozkladu zadaného celého čísla.

Řešení

- Myšlenka: kolikrát mohu beze zbytku podělit dvojkou.
- `kolik2 :: (Integral a, Integral b) => a -> b`
`kolik2 x = y where (y,_) = f_aux (0,x)`

```
f_aux (cnt, rem) =  
  if (rem<2) || (rem `mod` 2 /= 0)  
  then (cnt,rem)  
  else f_aux (cnt+1, rem `div` 2)
```

Zatřizení sezařených seznamů

- Napište funkci, která pro dva seřazené seznamy vrátí jeden seřazený seznam, který obsahuje všechny prvky z původních dvou seznamů, tj. zatřídí dva seznamy „do sebe“.

Řešení

- ```
merge [] x = x
merge x [] = x
merge (x:xs) (y:ys) = if x<y
 then x:merge xs (y:ys)
 else y:merge (x:xs) ys
```



## Řazení seznamů

- Napište funkci, která pro zadaný seznam vrátí seznam stejných prvků, ovšem seřazený podle operace  $<$ .

## Řešení

- Seznam nejprve rozdělím na dvě části, ty setřídím rekurzivně, a pak zatřídím do sebe.
- $\text{evenodd } (x:y:z) = (x:s,y:t) \text{ where } (s,t) = \text{evenodd } z$   
 $\text{evenodd } (x:[]) = ([],[x])$   
 $\text{evenodd } \_ = ([],[])$
- $\text{msort } [] = []$   
 $\text{msort } [x] = [x]$   
 $\text{msort } x = \text{merge } (\text{msort } xs) (\text{msort } ys)$   
    where  $(xs,ys) = \text{evenodd } x$

## Pozorování

- Rekurzi je možné najít i na místech, kde byste ji nehledali.
- Vše co se opakuje a směřuje ke konci, lze popsat rekurzí.

## Slovní úloha

- Na Jiříkovu narozeninovou párty přišlo 7 kamarádů a přineslo mimo jiné jeden narozeninový dort. Jiřík nebyl lakomý, rozdělil dort rovnoměrně mezi všechny přítomné. Jakou k tomu použil rekurzivní akci? (Jaký je typ příslušné rekurzivní funkce?)



## Pozorování

- Rekurzi je možné najít i na místech, kde byste ji nehledali.
- Vše co se opakuje a směřuje ke konci, lze popsat rekurzí.

## Slovní úloha

- Na Jiříkovu narozeninovou párty přišlo 7 kamarádů a přineslo mimo jiné jeden narozeninový dort. Jiřík nebyl lakomý, rozdělil dort rovnoměrně mezi všechny přítomné. Jakou k tomu použil rekurzivní akci? (Jaký je typ příslušné rekurzivní funkce?)

## Možné řešení

```
type KousekDortu = Float
dort :: [KousekDortu] -> [KousekDortu]
dort s = if (length s >= 8)
 then s
 else dort (map (/2) s ++ map (/2) s)
```



## Úkol 1

- Mějme konečný seznam celých čísel. Napište funkci, která vynásobí všechna čísla v seznamu zadaným parametrem, a pak ze seznamu ponechá pouze čísla dělitelná číslem 7.
- Funkci upravte tak, aby výše zmíněné číslo 7 nebylo fixně v kódu funkce, ale byl to její další parametr.

## Úkol 2

- Napište funkci, která o seznamu řetězců rozhodne, zda tento seznam obsahuje alespoň 4 řetězce délky minimálně 2.
- Funkci upravte tak, aby výše zmíněné čísla 4 a 2 nebyla fixně v kódu funkce, ale byly to její další parametry.

## Challenge 1

- Napište program, který pomocí principu rekurze a s využitím odpřednášených operací na seznamech vypočítá seznam obsahující čísla od 1 do 1024. Snažte se o to, aby hloubka rekurze byla co nejmenší (logaritmická).

## Challenge 2

- Jsou-li vám známy cykly s pevným počtem opakování z nějakého imperativního programovacího jazyka, popřemýšlejte o obecném postupu, jak nahradit tyto cykly voláním rekurzivní funkce.

# IB015 Neimperativní programování

## Funkce vyšších řádů a $\lambda$ -funkce

Jiří Barnat  
Libor Škarvada

## Datové struktury

- Uspořádané n-tice, seznamy.

## Hodnoty a typy

- Elementární, složené typy, typy funkcí.
- Polymorfní a kvalifikované typy.
- Hodnotové konstruktory.

## Rekurze

- Rekurzivní funkce na seznamech.

## Funkce vyšších řádů



## Definice

- Funkce, je považována za funkci vyššího řádu, pokud alespoň jeden z jejich argumentů, které funkce má, nebo výsledek, který funkce vrací, je opět funkce.
- Funkce vyššího řádu se též označují jako funkcionály.

## Příklady

$(.) :: (a \rightarrow b) \rightarrow (c \rightarrow a) \rightarrow c \rightarrow b$

$\text{map} :: (a \rightarrow b) \rightarrow [a] \rightarrow [b]$

## Pozorování

- Každou funkci, která má alespoň 2 argumenty, lze chápat jako funkci vyššího řádu.

## Příklad

- Funkci

$(*) :: \text{Num } a \Rightarrow a \rightarrow a \rightarrow a$

lze číst jako

$(*) :: \text{Num } a \Rightarrow a \rightarrow (a \rightarrow a)$

- Funkci, která bere dva číselné argumenty typu  $a$  a vrací hodnotu typu  $a$ , lze také chápat jako funkci, která bere hodnotu číselného typu  $a$  a vrací hodnotu typu  $a \rightarrow a$ .

## Pozorování

- Chápeme-li  $n$ -ární ( $n \geq 2$ ) funkce jako funkce vyššího řádu, lze tyto funkce tzv. **částečně aplikovat**, tj. vyhodnotit je i pro neúplný výčet argumentů.

## Příklad

- Uvažme funkci násobení
  - $(*) :: \text{Num } a \Rightarrow a \rightarrow (a \rightarrow a)$
  - $(*) \ x \ y = x*y$
- Výsledkem aplikace  $(*)$  na hodnotu  $3$  je funkce.
  - $(*) \ 3 :: \text{Num } a \Rightarrow a \rightarrow a$
- Tuto funkci je možné označit, a posléze použít.
  - $f = (*) \ 3$
  - $f :: \text{Num } a \Rightarrow a \rightarrow a$
  - $f \ 4 \rightsquigarrow ((*) \ 3) \ 4 \rightsquigarrow 12$

## Připomenutí

- Typový konstruktor  $\rightarrow$  je binární.
- Typový konstruktor  $\rightarrow$  se používá pouze infixově.

## Implicitní závorkování

- Typový konstruktor  $\rightarrow$  implicitně sdružuje zprava

$f :: a_1 \rightarrow (a_2 \rightarrow (a_3 \rightarrow \dots \rightarrow (a_{n-1} \rightarrow (a_n \rightarrow a)) \dots ))$

- Aplikace funkce na argumenty implicitně sdružuje zleva

$( \dots ( ( ( f \ x_1 ) \ x_2 ) \ x_3 ) \dots \ x_{n-1} ) \ x_n$

## Pozorování

- Libovolnou  $n$ -ární funkci lze také chápat jako  $k$ -ární, kde  $k$  nabývá hodnot od 1 do  $n$ .

**S každou aplikací ubude jeden výskyt  $\rightarrow$  v typu výrazu**

(+)            :: Num a => a -> a -> a

(+) 2         :: Num a =>         a -> a

((+) 2) 3    :: Num a =>             a

**S každou aplikací ubude jeden výskyt  $\rightarrow$  v typu výrazu**

$(+)$              $:: \text{Num } a \Rightarrow a \rightarrow a \rightarrow a$

$(+)$  2            $:: \text{Num } a \Rightarrow$              $a \rightarrow a$

$((+) 2) 3$        $:: \text{Num } a \Rightarrow$              $a$

**Specializací typové proměnné však mohou  $\rightarrow$  přibýt.**

- Vezměme například funkci identity

$\text{id} :: a \rightarrow a$

$\text{id } x = x$

- Při aplikaci  $\text{id}$  na  $(+)$  ubude  $\rightarrow$  z typu  $\text{id}$ , tj.

$\text{id } (+) :: a$

- Avšak po specializaci typové proměnné  $a$  na typ funkce  $(+)$

$\text{id } (+) :: \text{Num } a \Rightarrow a \rightarrow a \rightarrow a$

## Částečná aplikace

- Má-li funkce více formálních parametrů částečná aplikace probíhá vždy od parametru nejvíce vlevo.

## Problém

- Funkci nelze přímo částečně aplikovat na jiný než první parametr.

**Funkce `flip`**

- Při aplikaci na binární funkci tuto funkci modifikuje tak, aby své dva argumenty přijímala v obráceném pořadí.

```
flip :: (a -> b -> c) -> b -> a -> c
flip f x y = f y x
```

- Funkci `flip` je třeba chápat jako **modifikátor funkce**, ne jako prohazovačku parametrů!

**Příklady**

```
(-) 3 4 ~> -1
```

```
flip (-) 3 4 ~> 1
```

```
(-) flip 3 4 ~> ERROR
```



## Příklad

- Pomocí částečné aplikace funkce `(-)` definujte novou funkci `minus4`, která při aplikaci na číselnou hodnotu vrátí hodnotu o 4 menší.

## Řešení

- Definice s využitím částečné aplikace, bez formálních parametrů.

```
minus4 :: Num a => a -> a
minus4 = flip (-) 4
```

- Standardní definice téhož s využitím formálních parametrů.

```
minus4 :: Num a => a -> a
minus4 x = (-) x 4
```

## Pozorování

- Funkce vyššího řádu a částečná aplikace souvisí s násobným použitím funkcionálního typového konstrukturu  $\rightarrow$  .
- Chceme-li zabránit částečné aplikaci, musíme definovat funkci tak, aby v jejím typu byl pouze jeden výskyt  $\rightarrow$  .
- Pokud chceme funkci předat více argumentů najednou, předáme je jako uspořádanou n-tici.

## Příklad

- Všimněte si rozdílu v typech a definicích následujících funkcí.

```
krat :: Num a => a -> a -> a
```

```
krat x y = x * y
```

```
krat1 :: Num a => (a,a) -> a
```

```
krat1 (x,y) = x * y
```

## Funkce `curry` a `uncurry`

- Předdefinované funkce pro změnu řádu binárních funkcí.

### `curry`

- Modifikuje funkci tak, že tato funkce místo uspořádané dvojice hodnot přijímá dva samostatné parametry.

```
curry :: ((a,b) -> c) -> a -> b -> c
curry f x y = f (x,y)
```

### `uncurry`

- Modifikuje funkci tak, že tato funkce místo dvou samostatných parametrů přijímá uspořádanou dvojici hodnot.

```
uncurry :: (a -> b -> c) -> (a,b) -> c
uncurry f (x,y) = f x y
```

## Příklad

- Mějme definovány následující funkce

```
krat :: Num a => a -> a -> a
```

```
krat x y = x * y
```

```
krat1 :: Num a => (a,a) -> a
```

```
krat1 (x,y) = x * y
```

- Uvedte alternativní definici funkce `krat` pomocí funkce `krat1` a obráceně.

## Příklad

- Mějme definovány následující funkce

```
krat :: Num a => a -> a -> a
krat x y = x * y
```

```
krat1 :: Num a => (a,a) -> a
krat1 (x,y) = x * y
```

- Uvedte alternativní definici funkce `krat` pomocí funkce `krat1` a obráceně.

## Řešení

```
krat = curry krat1
krat1 = uncurry krat
```

## Co je to

- Pro každý **binární operátor** je možné definovat funkci, jež odpovídá částečné aplikaci funkce na první formální parametr a funkci, jež odpovídá částečné aplikaci funkce na druhý formální parametr. Těmto funkcím se říká **operátorové sekce**.

## Operátorové sekce

- Předpokládejme binární operátor  $\oplus$  a hodnoty  $p$  a  $q$   
 $\oplus :: a \rightarrow b \rightarrow c$   
 $p :: a$   
 $q :: b$
- Částečnou aplikaci na první argument zapíšeme jako  $(p\oplus)$   
 $(p\oplus) = (\oplus) p$
- Částečnou aplikaci na druhý argument zapíšeme jako  $(\oplus q)$   
 $(\oplus q) = \text{flip } (\oplus) q$

## Příklad 1

- Jednoduché použití operátorových sekcí.

`(*2) 34`  $\rightsquigarrow$  68

`(++".") ['V', 'ě', 't', 'a']`  $\rightsquigarrow$  "Věta."

## Příklad 2

- Odvodte typ následujících funkcí, popište jejich význam:

`(1.0/)`

`('mod' 3)`

`(!!0)`

`(>0)`

## Příklad 1

- Jednoduché použití operátorových sekcí.

`(*2) 34 ~> 68`

`(++".") ['V', 'ě', 't', 'a'] ~> "Věta."`

## Příklad 2

- Odvoďte typ následujících funkcí, popište jejich význam:

`(1.0/) :: Fractional a => a -> a`

`('mod' 3) :: Integral a => a -> a`

`(!!0) :: [a] -> a`

`(>0) :: (Num a, Ord a) => a -> Bool`



## Skládání funkcí

- Základní operátor funkcionálního programování

$$(\cdot) :: (b \rightarrow c) \rightarrow (a \rightarrow b) \rightarrow a \rightarrow c$$
$$(\cdot) f g x = f ( g x )$$

## Pozorování

- Operátor pro skládání funkcí lze chápat také jako binární.

$$(\cdot) :: (b \rightarrow c) \rightarrow (a \rightarrow b) \rightarrow (a \rightarrow c)$$

- Pro operátor  $(\cdot)$  je možné definovat operátorovou sekci.
- Použití operátorové sekce pro operátor  $(\cdot)$  na jiné než jednoduché funkce je však velmi matoucí a v praxi se nepoužívá.

$$(\cdot(\cdot)) :: (((a \rightarrow b) \rightarrow a \rightarrow c) \rightarrow d) \rightarrow (b \rightarrow c) \rightarrow d$$

## Skládání funkcí

- Základní operátor funkcionálního programování

$(.) :: (b \rightarrow c) \rightarrow (a \rightarrow b) \rightarrow a \rightarrow c$

$(.) f g x = f ( g x )$

## Pozorování

- Operátor pro skládání funkcí lze chápat také jako binární.

$(.) :: (b \rightarrow c) \rightarrow (a \rightarrow b) \rightarrow (a \rightarrow c)$

- Pro operátor  $(.)$  je možné definovat operátorovou sekci.
- Použití operátorové sekce pro operátor  $(.)$  na jiné než jednoduché funkce je však velmi matoucí a v praxi se nepoužívá.



$(.(.)) :: (((a \rightarrow b) \rightarrow a \rightarrow c) \rightarrow d) \rightarrow (b \rightarrow c) \rightarrow d$

## Pozorování

- Funkce `flip`, `curry`, `uncurry`, `(.)` a operátorové sekce používáme k vytvoření tzv. **bezparametrové** definice funkce.

## Připomenutí bezparametrové definice

- Funkci `f` definovanou s použitím formálního parametru

```
f x = (not.odd) x
```

- Je možné definovat i bez použití formálního parametru

```
f = (not.odd)
```

## Příklad

```
f x = (3*x)^7
```

```
f x = flip (^) 7 (3*x)
```

```
f x = flip (^) 7 ((* 3) x)
```

```
f x = (.) (flip (^) 7) ((* 3) x)
```

```
f x = (.) (flip (^) 7) (3*) x
```

```
f = (.) (flip (^) 7) (3*)
```

# Nepojmenované funkce

( $\lambda$ -funkce)

## Motivace

- Při standardní definici funkce musíme tuto funkci pojmenovat.
- Mnohé funkce, často jednoduché, použijeme jednorázově.
- Funkce s jednorázovým použitím je zbytečné pojmenovávat.

## Příklad

- Globální definice a použití jednoduché funkce

```
f x = x*x + 1
```

```
map f [1,2,3,4,5] ~> [2,5,10,17,26]
```

- Lokální definice a použití jednoduché funkce

```
let f x = x*x + 1 in map f [1,2,3,4,5] ~> [2,5,10,17,26]
```

## Co to je

- Definice funkce v místě jejího použití bez uvedení jejího jména.
- Příklad:

`map (\x -> x*x+1) [1,2,3,4,5]  $\rightsquigarrow$  [2,5,10,17,26]`

## Původ a všeobecné označení

- Myšlenka a teoretický základ pochází z Lambda kalkulu, proto se též nepojmenováním funkcím říká **lambda funkce**.
- Principu vytváření lambda funkcí, se říká lambda abstrakce.

## Pozorování

- Koncept lambda funkcí se vyskytuje v mnoha imperativních programovacích jazycích, např. C++, C#, SCALA, PHP, ...

## Lambda abstrakce

- Uvažme výraz  $M$ , který představuje tělo funkce.

$$M \equiv x * x + 1$$

- Z těla funkce vytvoříme funkci použitím lambda abstrakce.

$$\lambda x.M \equiv \lambda x.(x * x + 1)$$

- Při aplikaci lambda funkce  $\lambda x.M$  na výraz  $N$ , se všechny volné výskyty formálního parametru  $x$  v  $M$  nahradí výrazem  $N$ . Výskyt proměnné  $x$  je označován jako volný, pokud není v rozsahu žádné lambda abstrakce.

$$\lambda x.M N \equiv \lambda x.(x * x + 1) N = N * N + 1$$

## Příklady

- $(\lambda x.x * x + 1) 3 = 3 * 3 + 1 = 10$ .
- $(\lambda x.x + (\lambda x.x + x) x) 5 = 5 + (\lambda x.x + x) 5 = 5 + (5 + 5) = 15$ .
- $(\lambda x.34) 3 = 34$

## Definice a použití nepojmenované funkce

- $\lambda$  se špatně píše na klávesnici.
- V programovacím jazyce *Haskell* je lambda abstrakce zapsána pomocí zpětného lomítka a šipky:

```
\ formální parametry -> tělo funkce
```

## Příklady

```
(\ x -> x*x + x*x) 3 ~> ... ~> 18
```

```
(\ x -> x False) not ~> not False ~> True
```

## Nepojmenovanou funkci je možné pojmenovat

```
f = (\ x -> x*x + x*x)
```

```
f 3 ~> ... ~> 18
```

```
f 3 ~> (\ x -> x*x + x*x) 3 ~> ... ~> 18
```



## Pozorování

- Vnořená lambda abstrakce vytváří funkce vyšších řádů.
- $(\lambda x.(\lambda y.(x - y))) 3 4 = (\lambda y.(3 - y)) 4 = 3 - 4 = -1$

## Zápis v Haskellu

- Odvozený přímo z vícenásobné aplikace lambda abstrakce  
 $\backslash x \rightarrow (\backslash y \rightarrow x - y)$   
 $(\backslash x \rightarrow (\backslash y \rightarrow x - y)) 3 4 \rightsquigarrow \dots \rightsquigarrow -1$
- Zkrácený z důvodu čitelnosti kódu a pohodlí programátorů  
 $\backslash x y \rightarrow x - y$   
 $(\backslash x y \rightarrow x - y) 3 4 \rightsquigarrow \dots \rightsquigarrow -1$

## Nepojmenované funkce a jejich typy

- Obecně platí stejná pravidla jako pro pojmenované funkce.
- Název funkce (ani jeho neexistence) nemá vliv na typ funkce.

## Efekt lambda abstrakce na typ

- Každý formální parametr v lambda abstrakci přidá do typu výrazu jeden výskyt typového konstrukturu  $\rightarrow$  a novou typovou proměnnou, která se navíc specializuje podle kontextu použití konkrétního formálního parametru.

## Pozorování

- Typ funkce si Hugs/GHCi umí odvodit z její definice.

## Příklad 1

```
'a' :: Char
(\ x -> 'a') :: a -> Char
(\ x y -> 'a') :: a -> b -> Char
(\ x -> (\ y -> 'a')) :: a -> b -> Char
```

## Příklad 2

```
\ x y -> x !! y :: [a] -> Int -> a
\ x y -> x || y :: Bool -> Bool -> Bool
```

## Příklad 3

```
(\ x y -> x . y) :: (a -> b) -> (c -> a) -> c -> b
(\ x y -> x y) :: (a -> b) -> a -> b
```

## Pozorování

- Vnořené aplikace funkcí mohou být díky závorkování nečitelné.
- Něterým uzávorkováním se lze vyhnout použitím aplikačního operátoru \$ , který má při vyhodnocování nejnižší prioritu.

## Aplikační operátor (\$)

- (\$) :: (a -> b) -> a -> b
- (\$) f x = f x

## Infixové použití

- $f(g\ x) \equiv (\$)\ f\ (g\ x) \equiv f\ \$\ (g\ x) \equiv f\ \$\ g\ x$
- $f(g(h\ x)) \equiv f\ \$\ g\ \$\ h\ x$
- $\$ f\ x \rightsquigarrow^* \text{ERROR}$

## Ekvivalentní zápisy pomocí operátoru \$

- `not ( not ( not ( not ( not True ))) ) )`  
`not $ not $ not $ not $ not True`
- `(+1) ((+2) ((+3) ((+4) 0)))`  
`(+1) $ (+2) $ (+3) $ (+4) 0`
- `(even ((+1) 0)) || (odd ((+2) 0))`  
`(even $ (+1) 0) || (odd $ (+2) 0)`

## Příklady

- `(++) [1] $ map (+1) [1] ~>* [1,2]`
- `[1] ++ $ map (+1) [1] ~>* ERROR`
- Rozsah platnost \$ je podřízen syntaktickému pravidlu o zarovnání, tj. v do notaci "končí s koncem řádku".

## Mentální cvičení

- Definujte operátorové sekce pomocí lambda abstrakce.
- Identifikujte funkce vyššího řádu ve svém každodenním životě.

# IB015 Neimperativní programování

Redukční strategie, Nekonečné datové struktury  
Zápis a generování seznamů

Jiří Barnat  
Libor Škarvada

## Redukční strategie



## Redukční krok

- Úprava výrazu, v němž se některý jeho podvýraz nahradí zjednodušeným podvýrazem.
- Upravovaný podvýraz (**redex**) má tvar aplikace funkce na argumenty, upravený podvýraz má tvar pravé strany definice této funkce do níž jsou za formální parametry dosažené skutečné argumenty.

## Redukční strategie

- Předpis, který určuje jaký podvýraz se bude upravovat v následujícím redukčním kroku.

## Striktní redukční strategie

- Při úpravě aplikace  $F X$  nejdříve úplně upravíme argument  $X$ . Teprve nelze-li už upravovat argument  $X$ , upravujeme výraz  $F$ . Až nakonec upravíme (podle definice funkce) celý výraz  $F X$ .
- Při úpravě výrazů tedy postupujeme **zevnitř**.

## Normální redukční strategie

- Upravovaným podvýrazem je celý výraz; nelze-li takto upravit aplikaci  $F X$ , upravíme nejdříve výraz  $F$ , pokud to nestačí k tomu, abychom mohli upravit  $F X$ , upravujeme částečně výraz  $X$ , ale pouze do té míry, abychom mohli upravit výraz  $F X$ .
- Při úpravě výrazů tedy postupujeme **zvnějšku**.

## Líná redukční strategie

- Normální redukční strategii, při níž si pamatujeme hodnoty upravených podvýrazů a žádný s opakovaným výskytem nevyhodnocujeme více než jednou.
- Využívá referenční transparentnost.
- Nelze aplikovat na výrazy s vedlejším efektem.

## Haskell

- Používá **normální redukční strategii**.
- Nicméně mluví se o **líném vyhodnocování**, zjednodušeně řečeno, vyhodnotí se pouze to, co je potřeba k dalšímu výpočtu.

## Definice funkce

- $\text{cube } x = x * x * x$

## Striktní redukční strategie

- $\text{cube } \underline{(3+5)} \rightsquigarrow \underline{\text{cube } 8} \rightsquigarrow \underline{8 * 8 * 8} \rightsquigarrow \underline{64 * 8} \rightsquigarrow 512$

## Normální redukční strategie

- $\underline{\text{cube } (3+5)} \rightsquigarrow \underline{(3+5) * (3+5) * (3+5)} \rightsquigarrow 8 * \underline{(3+5) * (3+5)}$   
 $\rightsquigarrow \underline{8 * 8} * (3+5) \rightsquigarrow 64 * \underline{(3+5)} \rightsquigarrow \underline{64 * 8} \rightsquigarrow 512$

## Líná redukční strategie

- $\underline{\text{cube } (3+5)} \rightsquigarrow \underline{(3+5) * (3+5) * (3+5)} \rightsquigarrow \underline{8 * 8 * 8} \rightsquigarrow$   
 $\underline{64 * 8} \rightsquigarrow 512$

## Líná redukční strategie a Haskell?

- V Haskellu lze docílit, pouze pokud je stejný podvýraz ve výrazu zaveden pomocí lokální definice, nebo je výsledkem substituce za formální parametr.
- Haskell používá tzv. Graph Reduction.
- Ne vše lze líně vyhodnotit (výrazy s vedlejším efektem).

## Příklad

- $\text{cube } (3+5) * (3+5) \rightsquigarrow (3+5) * (3+5) * (3+5) * (3+5) \rightsquigarrow$   
 $8 * 8 * 8 * (3+5) \rightsquigarrow 64 * 8 * (3+5) \rightsquigarrow 512 * (3+5) \rightsquigarrow$   
 $512 * 8 \rightsquigarrow 4096$

## Více info viz

- [https://en.wikipedia.org/wiki/Graph\\_reduction](https://en.wikipedia.org/wiki/Graph_reduction)
- [https://wiki.haskell.org/GHC/FAQ#Does\\_GHC\\_do\\_common\\_subexpression\\_elimination.3F](https://wiki.haskell.org/GHC/FAQ#Does_GHC_do_common_subexpression_elimination.3F)
- [https://wiki.haskell.org/GHC\\_optimisations#Common\\_subexpression\\_elimination](https://wiki.haskell.org/GHC_optimisations#Common_subexpression_elimination)

## Referenční transparence

- Výsledek vyhodnocení výrazu nezávisí na kontextu, ve kterém se daný výraz vyhodnocuje.
- Může mít vedlejší efekt, ten ale nesmí ovlivnit výsledek.
- Haskell je **referenčně transparentní**,

## Vedlejší efekt vyhodnocení výrazu či funkce

- Změna stavu světa, která je pozorovatelná vně volané funkce nad rámec návratové hodnoty.
- Například modifikace globální proměnné, modifikace hodnot v kontextu rodičovské funkce, modifikace externí paměti, atd.

## Pozorování

- Použitá strategie může ovlivnit chování programu.

## Příklad 1

- Uvažme funkci `const`

```
const :: a -> b -> a
```

```
const x y = x
```

- Při striktním vyhodnocování dojde k dělení nulou

```
const 2 (1/0) \rightsquigarrow ERROR
```

- Při normálním vyhodnocování k němu nedojde

```
const 2 (1/0) \rightsquigarrow 2
```

## Příklad 2

- Uvažme funkci `undf`

```
undf x :: Int -> Int
```

```
undf x = undf x
```

- Striktní vyhodnocování následujícího výrazu vede k zacyklení

```
head (tail [undf 1, 4]) =
```

```
head (tail (undf 1 : 4 : [])) ~>
```

```
head (tail (undf 1 : 4 : [])) ~>
```

```
...
```

- Při normálním vyhodnocování k zacyklení nedojde:

```
head (tail [undf 1, 4]) =
```

```
head (tail (undf 1 : 4 : [])) =
```

```
head (tail (undf 1 : 4 : [])) ~>
```

```
head (4 : []) ~> 4
```



## Churchova-Rosserova věta

- Výsledná hodnota ukončeného výpočtu výrazu nezáleží na redukční strategii: pokud výpočet skončí, je jeho výsledek vždy stejný.

## Interpretace věty

- Churchova-Rosserova věta **nevylučuje různé chování** výpočtu při různých strategiích. Při některých strategiích může výpočet skončit, při jiných cyklovat. Nebo je výpočet podle jedné strategie delší než podle jiné. Nikdy však **nemůže skončit dvěma různými výsledky**.

## O perpetualitě

- Jestliže pro nějaký výraz  $M$  existuje redukční strategie, s jejímž použitím se úprava výrazu  $M$  zacyklí, pak se tento výpočet zacyklí i s použitím striktní redukční strategie.

## Interpretace věty

- Věta o perpetualitě říká, že z hlediska možnosti zacyklení výpočtu je striktní redukční strategie nejméně bezpečná. Když se při jejím použití výpočet nezacyklí, pak se nezacyklí ani při žádné jiné strategii.

## O normalizaci

- Jestliže pro nějaký výraz  $M$  existuje redukční strategie, s jejímž použitím se úprava výrazu  $M$  nezacyklí, pak se tento výpočet nezacyklí ani s použitím normální redukční strategie.

## Interpretace věty

- Věta o normalizaci říká, že z hlediska možnosti zacyklení výpočtu je normální redukční strategie nejbezpečnější. To neznamena, že by se s jejím použitím výpočet zacyklit nemohl; z věty však plyne, že když se to stane a výpočet se i při normální redukční strategii zacyklí, pak se zacyklí i při každé jiné strategii.

## Jiný pohled

- Při použití normální redukční strategie je výraz vyhodnocen až v okamžiku, kdy je potřeba pro další výpočet.
- Přístup, který jde nad rámec redukční strategie.

## Příklady

- Líné čtení řetězce ze vstupu:  
`getContents :: IO String`
- Líné vyhodnocování Boolovských operátorů v imperativních programovacích jazycích.  
`(True OR (1/0)) = True`  
`(open(... ) OR die) - "umře" pokud open selže.`

## Práce s nekonečnými seznamy

## Nekonečné datové struktury

- Vyhodnocení výrazu až v okamžiku, kdy je potřeba pro další výpočet, umožňuje manipulaci s nekonečnými datovými strukturami.
- Příkladem nekonečné datové struktury je **nekonečný seznam**.

## Nekonečné opakování jednoho prvku

- `repeat :: a -> [a]`  
`repeat x = x : repeat x`

## Jak to funguje?

- `take 8 (repeat 1)  $\rightsquigarrow^*$  [1,1,1,1,1,1,1,1]`
- `head (repeat 1)  $\rightsquigarrow$  head (1 : repeat 1)  $\rightsquigarrow$  1`

## Nekonečné opakování seznamu

- `cycle :: [a] -> [a]`  
`cycle x = x ++ cycle x`

## Opakovaná aplikace funkce

- `iterate :: (a -> a) -> a -> [a]`  
`iterate f z = z : iterate f (f z)`

## Vyhodnoťte

- `take 4 (iterate not True) ~>*`
- `take 4 (iterate (+1) 0 ) ~>*`

## Nekonečné opakování seznamu

- `cycle :: [a] -> [a]`  
`cycle x = x ++ cycle x`

## Opakovaná aplikace funkce

- `iterate :: (a -> a) -> a -> [a]`  
`iterate f z = z : iterate f (f z)`

## Vyhodnoťte

- `take 4 (iterate not True) ~>*` `[True,False,True,False]`
- `take 4 (iterate (+1) 0 ) ~>*` `[0,1,2,3]`



## Alternativní definice

- `jednicky = repeat 1`
- `jednicky = iterate (+0) 1`
- `jednicky = iterate (id) 1`
- `jednicky = cycle [1]`
- `nats = iterate (+1) 0`

## Další příklady

- `take 10 (iterate (*2) 1) ~>*`
- `take 5 (iterate ('a':) []) ~>*`
- `take 10 (iterate (*(-1)) 1) ~>*`
- `take 8 (cycle "Ha ") ~>*`

## Alternativní definice

- `jednicka = repeat 1`
- `jednicka = iterate (+0) 1`
- `jednicka = iterate (id) 1`
- `jednicka = cycle [1]`
- `nats = iterate (+1) 0`

## Další příklady

- `take 10 (iterate (*2) 1) ~>*` `[1,2,4,8,16,32,64,128,256,512]`
- `take 5 (iterate ('a':) []) ~>*` `["","a","aa","aaa","aaaa"]`
- `take 10 (iterate (*(-1)) 1) ~>*` `[1,-1,1,-1,1,-1,1,-1,1,-1]`
- `take 8 (cycle "Ha ") ~>*` `"Ha Ha Ha"`

## Líně vyhodnocená rekurze

- K definici nekonečných datových struktur jsme použili rekurzi.
- Rekurze se zanoří **pouze tolikrát, kolikrát je třeba**.

## Příklad

- Seznam nekonečně mnoha jedniček:

`jednický = 1 : jednický`

- Vyhodnocení výrazu `jednický` se zacyklí při každé strategii:

`jednický`  $\rightsquigarrow$  `1:jednický`  $\rightsquigarrow$  `1:1:jednický`  $\rightsquigarrow$  ...

- Ale je-li výraz `jednický` podvýrazem většího výrazu, tak se jeho vyhocení při líné strategii nemusí zacyklit.

`head jednický` = `head jednický`  $\rightsquigarrow$  `head (1:jednický)`  $\rightsquigarrow$  1

## Nekonečný rostoucí seznam všech přirozených čísel

- `nats = 0 : zipWith (+) nats jednicka`

|       |   |   |   |   |   |   |     |          |
|-------|---|---|---|---|---|---|-----|----------|
|       | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | ... | nats     |
| +     | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | ... | jednicka |
| <hr/> |   |   |   |   |   |   |     |          |
|       | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6   | ...      |

## Fibonacciho posloupnost

- `fibs = 0 : 1 : zipWith (+) fibs (tail fibs)`

|       |   |   |   |   |   |   |   |     |           |
|-------|---|---|---|---|---|---|---|-----|-----------|
|       |   | 0 | 1 | 1 | 2 | 3 | 5 | ... | fibs      |
| +     |   | 1 | 1 | 2 | 3 | 5 | 8 | ... | tail fibs |
| <hr/> |   |   |   |   |   |   |   |     |           |
|       | 0 | 1 | 1 | 2 | 3 | 5 | 8 | 13  | ...       |

## Zápis a generování seznamů

## Prostý výčet

- Zápis pomocí základních hodnotových konstruktorů (`:`) a `[]`

```
1:2:3:4:5:[]
```

- Ekvivalentní zkrácený zápis (syntaktická zkratka pro totéž).

```
[1,2,3,4,5]
```

## Hromadný výčet

- Seznamy hodnot, které lze systematicky vyjmenovat (enumerovat) lze zadat tzv. **hromadným výčtem**.

- Seznamy zadané enumerační funkcí `enumFromTo`

```
enumFromTo 1 12 ~>* [1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12]
```

```
enumFromTo 'A' 'Z' ~>* "ABCDEFGHIJKLMNOPQRSTUVWXYZ"
```

- Všechny uspořádatelné typy jsou enumerovatelné.

## Nekonečná enumerace

- Enumerovat lze i hodnoty typů s nekonečnou doménou.
- Hromadným výčtem lze definovat nekonečné seznamy.

```
nats = enumFrom 0
```

## Enumerace s udaným vzorem

- Udáním druhého prvku lze definovat vzor enumerace:

```
take 10 (enumFromThen 0 2) ~>* [0,2,4,6,8,10,12,14,16,18]
enumFromThenTo 0 3 15 ~>* [0,3,6,9,12,15]
```

## Přehled enumeračních funkcí a syntaktických zkratk

| Enumerační funkce                  | Typ                                             | Zkratka                |
|------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------|
| <code>enumFrom m</code>            | <code>Enum a =&gt; a-&gt;[a]</code>             | <code>[m..]</code>     |
| <code>enumFromTo m n</code>        | <code>Enum a =&gt; a-&gt;a-&gt;[a]</code>       | <code>[m..n]</code>    |
| <code>enumFromThen m m'</code>     | <code>Enum a =&gt; a-&gt;a-&gt;[a]</code>       | <code>[m,m'..]</code>  |
| <code>enumFromThenTo m m' n</code> | <code>Enum a =&gt; a-&gt;a-&gt;a-&gt;[a]</code> | <code>[m,m'..n]</code> |

## Intenzionální definice seznamu

- Prvky seznamu jsou generovány společným pravidlem, které předepisuje jak prvky z nějaké nosné množiny přepsat na prvky generovaného seznamu.
- Příklad: prvních deset násobků čísla 2  
[ 2\*n | n <- [0..9] ]

## Obecná šablona

- [ definiční\_výraz | generátor a kvalifikátory ]
- Za každý vygenerovaný prvek vyhovující všem kvalifikátorům se do definovaného seznamu přidá jedna hodnota definičního výrazu.
- Definiční výraz může a nemusí použít generované prvky.
- Kvalifikátory a generátory se vyhodnocují **zleva doprava**.



## Generátor

- `nová_proměnná <- seznam` nebo `vzor <- seznam`
- Definuje novou proměnou použitelnou buď v definičním výrazu nebo v libovolném kvalifikátoru vyskytujícím se vpravo.
- Nová proměnná postupně nabývá hodnot prvků v seznamu.
- V případě použití vzoru, se vygeneruje tolik instancí, kolik prvků v seznamu odpovídá použitému vzoru.

## Kombinace více generátorů

- Při použití více generátorů se generují všechny kombinace.
- Pořadí kombinací je dáno uspořádáním generátorů v definici.
- Nejvyšší váhu má generátor vlevo, směrem doprava váha klesá.

## Predikát

- Výraz typu `Bool` .
- Může využít proměnné definované od predikátu vlevo.
- Vygenerované instance, které nevyhovují predikátu, nebudou brány v potaz pro definici výsledného seznamu.

## Lokální definice

- `let nová_proměnná = výraz`
- Definuje novou proměnou použitelnou buď v definičním výrazu nebo v libovolném kvalifikátoru vyskytujícím se vpravo.
- Výraz může využít proměnné definované vlevo.

- [  $n^2 \mid n \leftarrow [0..3]$  ]  
     $\rightsquigarrow^*$  [0,1,4,9]
- [ (c,k) | c<-"abc", k<-[1,2] ]  
     $\rightsquigarrow^*$  [('a',1),('a',2),('b',1),('b',2),('c',1),('c',2)]
- [  $3*n \mid n \leftarrow [0..6], \text{ odd } n$  ]  
     $\rightsquigarrow^*$  [3,9,15]
- [ (m,n) | m<-[1..3], n<-[1..3], n<=m ]  
     $\rightsquigarrow^*$  [(1,1),(2,1),(2,2),(3,1),(3,2),(3,3)]
- [ (m,n) | m<-[1..3], n<-[1..m] ]  
     $\rightsquigarrow^*$  [(1,1),(2,1),(2,2),(3,1),(3,2),(3,3)]
- [ (x,y) | z<-[0..2], x<-[0..z], let y=z-x ]  
     $\rightsquigarrow^*$  [(0,0),(0,1),(1,0),(0,2),(1,1),(2,0)]

- `[ replicate n c | c<-"xyz", n<-[2,3] ]`  
     $\rightsquigarrow^*$  `["xx","xxx","yy","yyy","zz","zzz"]`
- `[ replicate n c | n<-[2,3], c<-"xyz"]`  
     $\rightsquigarrow^*$  `["xx","yy","zz","xxx","yyy","zzz"]`
- `[ x^2 | [x]<-[[], [2,3], [4], [1,1..], [], [7], [0..]] ]`  
     $\rightsquigarrow^*$  `[16,49]`
- `[ 0 | []<-[[], [2,3], [4], [0..], [], [5]] ]`  
     $\rightsquigarrow^*$  `[0,0]`
- `[ x^3 | x<-[0..10], odd x ]`  
     $\rightsquigarrow^*$  `[1,27,125,343,729]`
- `[ x^3 | x<-[0..10], odd x, x < 1 ]`  
     $\rightsquigarrow^*$  `[]`

## Redefinice známých funkcí

- `length :: [a] -> Int`  
`length s = sum [ 1 | _ <- s ]`
- `map :: (a->b) -> [a] -> [b]`  
`map f s = [ f x | x <- s ]`
- `filter :: (a->Bool) -> [a] -> [a]`  
`filter p s = [ x | x <- s, p x ]`
- `concat :: [[a]] -> [a]`  
`concat s = [ x | t <- s, x <- t ]`

## Nové funkce

- `isOrdered :: Ord a => [a] -> Bool`  
`isOrdered s = and [ x<=y | (x,y) <- zip s (tail s) ]`
- `samohlasky :: String -> String`  
`samohlasky s = [ v | v <- s, v `elem` "aeiouy"]`

## Úkol

- Napište funkci, která při aplikaci na konečný seznam uspořadatelných hodnot vrátí seznam těchto hodnot uspořádaných operátorem `<`.

## Řešení

- Funkce `qSort` seřadí seznam hodnot vzestupně.
- `qSort :: Ord a => [a] -> [a]`  
`qSort [] = []`  
`qSort (p:s) = qSort [ x | x<-s, x<p ]`  
`++ [p] ++`  
`qSort [ x | x<-s, x>=p ]`

# Prvočísla – Eratosthenovo síto

|   |          |          |          |   |   |   |   |    |           |    |           |    |    |    |           |    |           |    |    |    |    |           |    |    |    |    |    |    |    |           |
|---|----------|----------|----------|---|---|---|---|----|-----------|----|-----------|----|----|----|-----------|----|-----------|----|----|----|----|-----------|----|----|----|----|----|----|----|-----------|
| 2 | 3        | 4        | 5        | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11        | 12 | 13        | 14 | 15 | 16 | 17        | 18 | 19        | 20 | 21 | 22 | 23 | 24        | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 |    |    |           |
|   | <b>3</b> |          | 5        |   | 7 |   | 9 |    | 11        |    | 13        |    | 15 |    | 17        |    | 19        |    | 21 |    | 23 |           | 25 |    | 27 |    | 29 |    |    |           |
|   |          | <b>5</b> |          | 5 |   | 7 |   |    | 11        |    | 13        |    |    |    | 17        |    | 19        |    |    |    | 23 |           | 25 |    |    |    |    | 29 |    |           |
|   |          |          | <b>7</b> |   |   | 7 |   |    | 11        |    | 13        |    |    |    | 17        |    | 19        |    |    |    | 23 |           |    |    |    |    |    |    | 29 |           |
|   |          |          |          |   |   |   |   |    | <b>11</b> |    | 13        |    |    |    | 17        |    | 19        |    |    |    | 23 |           |    |    |    |    |    |    | 29 |           |
|   |          |          |          |   |   |   |   |    |           |    | <b>13</b> |    |    |    | 17        |    | 19        |    |    |    | 23 |           |    |    |    |    |    |    | 29 |           |
|   |          |          |          |   |   |   |   |    |           |    |           |    |    |    | <b>17</b> |    | 19        |    |    |    | 23 |           |    |    |    |    |    |    | 29 |           |
|   |          |          |          |   |   |   |   |    |           |    |           |    |    |    |           |    | <b>19</b> |    |    |    | 23 |           |    |    |    |    |    |    | 29 |           |
|   |          |          |          |   |   |   |   |    |           |    |           |    |    |    |           |    |           |    |    |    |    | <b>23</b> |    |    |    |    |    |    | 29 |           |
|   |          |          |          |   |   |   |   |    |           |    |           |    |    |    |           |    |           |    |    |    |    |           |    |    |    |    |    |    |    | <b>29</b> |

## Prvočísla

- Pro každé  $p$ ,  $2 \leq p \in \mathbb{N}$  platí:  $p$  je prvočíslo, právě když  $p$  není násobkem žádného prvočísla menšího než  $p$ .
- `es :: Integral a => [a] -> [a]`  
`es (p:t) = p : es [ n | n<-t, n`mod`p/=0 ]`

```
primes = es [2..]
```

## Pozorování

- Využití generátorů seznamů ve spojení s nekonečnými seznamy trochu kazí čistotu deklarativního přístupu, ve kterém se v zásadě nezajímáme o způsob vyhodnocení, ale pouze o podstatu vyjádření vztahů.

## Porovnejte a vysvětlete rozdíl

- `take 4 [ x+y | x <- [1..], y<-[1..], x<2 ] ~>*`
- `take 4 [ x+y | y <- [1..], x<-[1..], x<2 ] ~>*`



## Pozorování

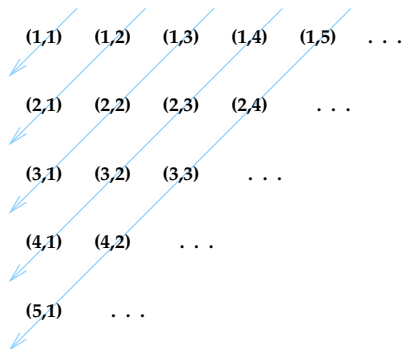
- Využití generátorů seznamů ve spojení s nekonečnými seznamy trochu kazí čistotu deklarativního přístupu, ve kterém se v zásadě nezajímáme o způsob vyhodnocení, ale pouze o podstatu vyjádření vztahů.

## Porovnejte a vysvětlete rozdíl

- `take 4 [ x+y | x <- [1..], y<-[1..], x<2 ]`  $\rightsquigarrow^*$  [2,3,4,5]
- `take 4 [ x+y | y <- [1..], x<-[1..], x<2 ]`  $\rightsquigarrow^*$  [2  
(druhý výpočet cyklí)

## Definice seznamů

- Definujte seznam všech uspořádaných dvojic přirozených čísel tak, aby dvojice byly v definovaném seznamu uspořádány dle následujícího schématu:



- Nápověda: součet čísel v dvojici je po diagonále shodný a postupně se zvyšuje o jedna.

# IB015 Neimperativní programování

A zase ta REKURZE!  
(rekurze na typech)

Jiří Barnat  
Libor Škarvada

# Uživatелеm definované typy

(algebraické typy)

## Pozorování

- Počítač veškerá data reprezentuje čísly.
- Programátoři jej dobrovolně, či nedobrovolně napodobují.

## Riziko

- Mnohdy číselná reprezentace různých hodnot není přímočará a tedy umožňuje nechtěné zadání neplatných hodnot.
- Neplatné hodnoty mohou vzniknout i neopatrnou aplikací číselných operací.
- **Použití neplatných hodnot může být nebezpečné.**

## Příklad

- Chceme reprezentovat den v týdnu a definovat funkce pracující s touto reprezentací.

- Možné číselné kódování, je následující:

pondělí = 1, úterý = 2, ..., neděle = 7

- Funkce `zitra` (s chybou) a funkce `je_pondeli` :

```
zitra :: Int -> Int
```

```
zitra x = x+1 - nesprávně i (x+1) 'mod' 7
```

```
je_pondeli :: Int -> Bool
```

```
je_pondeli x = if (x==1) then True else False
```

## Chyba ve výpočtu

```
je_pondeli 8 ~> False
```

```
je_pondeli (zitra 7) ~> ... ~> False
```

## Definice typů

- V Haskellu pomocí klíčového slova `data` .
- Obecná šablona:  
`data Název_typu = Hodnotové_konstruktory`
- Jednotlivé hodnotové konstruktory se oddělují znakem `|`
- Syntaktické omezení Haskellu: nově definovaný typ i hodnotové konstruktory musí začínat velkým písmenem.

## Příklad

- Dny v týdnu lze definovat jako nový typ, který má 7 hodnot.  
`data Dny = Po | Ut | St | Ct | Pa | So | Ne`
- Hodnoty jsou definovány výčtem.
- Jsou použity nulární hodnotové konstruktory – konstanty.

## Uživatелеm definované

- Obecná definice n-árního hodnotového konstruktoru:

**Jméno** **Typ**<sub>1</sub> ... **Typ**<sub>n</sub>

- Příklad typu s ternárním hodnotovým konstruktorem:

```
data Barva = RGB Int Int Int
```

- Hodnoty typu Barva:

```
RGB 42 42 42
```

```
RGB 12 (-23) 45
```

## Částečná aplikace hodnotového konstruktoru

```
RGB :: Int -> Int -> Int -> Barva
```

```
RGB 23 :: Int -> Int -> Barva
```

```
RGB 23 23 :: Int -> Barva
```

```
RGB 23 23 23 :: Barva
```



## Typové konstanty

- Definicí dle šablony:

```
data Název_typu = Hodnotové_konstruktory
zavádíme nový typ s označením Název_typu.
```

- **Název\_typu** je nulární typový konstruktork, typová konstanta.

## N-ární typové konstruktory

- Typové konstruktory jako například `->` nebo `[]` nedefinují typ, pouze předpis jak nový typ vyrobit.

## Tvorba typu

- Každá typová konstanta definuje typ.
- Typ získám také úplnou aplikací n-árních typových konstruktorů na již definované typy.

```
(->) Dny Bool = Dny -> Bool
```

```
[] Dny = [Dny]
```

```
(->) (Dny -> Bool) [Dny] = (Dny -> Bool) -> [Dny]
```

## Tvorba nových hodnot

- Aplikace hodnotových konstruktorů vytváří nové hodnoty.

## Tvorba nových typů

- Aplikace typových konstruktorů vytváří nové typy.

## Uspořádané n-tice a seznamy

- Používá se stejné označení pro typové i hodnotové konstruktory!

'a' :: Char

[('a','a'), ('a','a')] :: [(Char,Char)]

[('a','a'), ('a','a')] :: [(Char,Char)]

- hodnotové

- typové

## Polymorfní typové konstruktory

- Seznam prvků typu  $a$ , strom hodnot typu  $a$ , ...

## Definice polymorfních typových konstruktorů

- Definice s využitím typových proměnných:  
data **Název\_typu**  $a_1 \dots a_n = \dots$
- Typové proměnné lze použít pro definici hodnotových konstruktorů.

## Kompletní obecná šablona

```
data Tcons $a_1 \dots a_n =$ Dcons1 typ(1,1) typ(1,2) ... typ(1,arita1)
 ⋮
 Dcons m typ(m ,1) typ(m ,2) ... typ(m ,arita m)
```

## Maybe

- Předdefinovaný unární polymorfní typový konstruktor.  
`data Maybe a = Nothing | Just a`
- Zamýšlené použití pro funkce, jejichž hodnota může být nedefinována.

## Příklad

- Chceme ošetřit dělení nulou, definujeme novou funkci `deleni`  
`deleni :: Fractional a => a -> a -> Maybe a`  
`deleni x y = if (y==0) then Nothing else Just (x/y)`
- Jaký je výsledek aplikace `deleni` na argumenty `32` a `8` ?

## Maybe

- Předdefinovaný unární polymorfni typový konstruktore.  
`data Maybe a = Nothing | Just a`
- Zamýšlené použití pro funkce, jejichž hodnota může být nedefinována.

## Příklad

- Chceme ošetřit dělení nulou, definujeme novou funkci `deleni`  
`deleni :: Fractional a => a -> a -> Maybe a`  
`deleni x y = if (y==0) then Nothing else Just (x/y)`
- Jaký je výsledek aplikace `deleni` na argumenty 32 a 8?  
**Just 4.0**
- Proč je následující definice špatně?  
`deleni x y = if (y==0) then Nothing else (x/y)`

## type vs. data

- Zatímco s využitím `data` definuji nové typy, pomocí `type` zavádím typové aliasy (synonyma) k již existujícím typům.
- Používá se pro lepší čitelnost kódu.

## Příklady

- `type String = [Char]`
- `type Day = Int`  
`type Month = Int`  
`type Year = Int`  
`type Date = (Day,Month,Year)`

## Jiný pohled na rekurzivní funkce

## Rekurze

- Definice funkce, nebo datové struktury, s využitím sebe sama.

## Příklad

- Funkce `length`, která při aplikaci na seznam vrací jeho délku, je definovaná rekurzivně:

```
length :: [a] -> Integer
length [] = 0
length (_:s) = 1 + length s
```



## Zacyklení výpočtu

- Ne každé použití definovaného objektu na pravé straně definice je smysluplné.
- Nesprávné použití může vést k nekonečnému vyhodnocování, které nemá žádný efekt – **výpočet cyklů**.

## Příklad

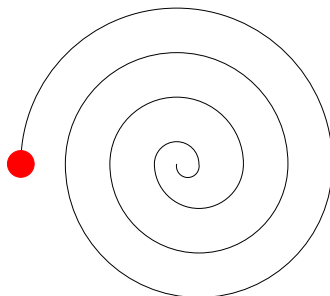
- Nesprávné použití rekurze ve funkci `length'` :  
`length' :: [a] -> Integer`  
`length' [] = 0`  
`length' x = length' x`
- Při aplikaci `length'` na neprázdný seznam výpočet cyklů.
- Chybu neodhalí typová kontrola, definice je typově správně.

## Pozorování

- Rekurze se někdy představuje jako definice kruhem. Lépe je však představit si rekurzi jako **spirálu**.
- Při výpočtu rekurzivního výrazu, který necyklí, se výpočet pohybuje "po spirále" a **nevyhnutelně** spěje k jejímu konci.

## Demonstrace

```
length [4,3,2,1]
= 1 + length [3,2,1]
= 1 + 1 + length [2,1]
= 1 + 1 + 1 + length [1]
= 1 + 1 + 1 + 1 + length []
= 1 + 1 + 1 + 1 + 0
= 4
```

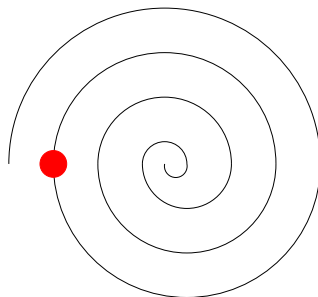


## Pozorování

- Rekurze se někdy představuje jako definice kruhem. Lépe je však představit si rekurzi jako **spirálu**.
- Při výpočtu rekurzivního výrazu, který necyklí, se výpočet pohybuje "po spirále" a **nevyhnutelně** spěje k jejímu konci.

## Demonstrace

```
length [4,3,2,1]
 = 1 + length [3,2,1]
 = 1 + 1 + length [2,1]
 = 1 + 1 + 1 + length [1]
 = 1 + 1 + 1 + 1 + length []
 = 1 + 1 + 1 + 1 + 0
 = 4
```

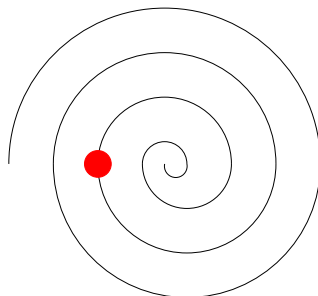


## Pozorování

- Rekurze se někdy představuje jako definice kruhem. Lépe je však představit si rekurzi jako **spirálu**.
- Při výpočtu rekurzivního výrazu, který necyklí, se výpočet pohybuje "po spirále" a **nevyhnutelně** spěje k jejímu konci.

## Demonstrace

```
length [4,3,2,1]
 = 1 + length [3,2,1]
 = 1 + 1 + length [2,1]
 = 1 + 1 + 1 + length [1]
 = 1 + 1 + 1 + 1 + length []
 = 1 + 1 + 1 + 1 + 0
 = 4
```

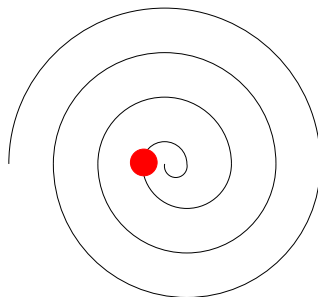


## Pozorování

- Rekurze se někdy představuje jako definice kruhem. Lépe je však představit si rekurzi jako **spirálu**.
- Při výpočtu rekurzivního výrazu, který necyklí, se výpočet pohybuje "po spirále" a **nevyhnutelně** spěje k jejímu konci.

## Demonstrace

```
length [4,3,2,1]
 = 1 + length [3,2,1]
 = 1 + 1 + length [2,1]
 = 1 + 1 + 1 + length [1]
 = 1 + 1 + 1 + 1 + length []
 = 1 + 1 + 1 + 1 + 0
 = 4
```

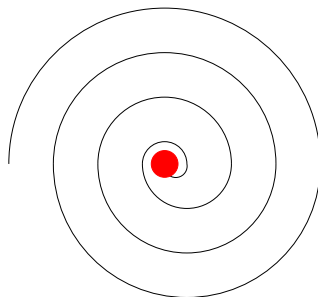


## Pozorování

- Rekurze se někdy představuje jako definice kruhem. Lépe je však představit si rekurzi jako **spirálu**.
- Při výpočtu rekurzivního výrazu, který necyklí, se výpočet pohybuje "po spirále" a **nevyhnutelně** spěje k jejímu konci.

## Demonstrace

```
length [4,3,2,1]
 = 1 + length [3,2,1]
 = 1 + 1 + length [2,1]
 = 1 + 1 + 1 + length [1]
 = 1 + 1 + 1 + 1 + length []
 = 1 + 1 + 1 + 1 + 0
 = 4
```

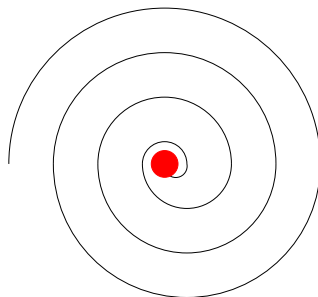


## Pozorování

- Rekurze se někdy představuje jako definice kruhem. Lépe je však představit si rekurzi jako **spirálu**.
- Při výpočtu rekurzivního výrazu, který necyklí, se výpočet pohybuje "po spirále" a **nevyhnutelně** spěje k jejímu konci.

## Demonstrace

```
length [4,3,2,1]
 = 1 + length [3,2,1]
 = 1 + 1 + length [2,1]
 = 1 + 1 + 1 + length [1]
 = 1 + 1 + 1 + 1 + length []
 = 1 + 1 + 1 + 1 + 0
 = 4
```

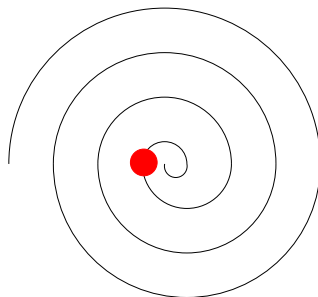


## Pozorování

- Rekurze se někdy představuje jako definice kruhem. Lépe je však představit si rekurzi jako **spirálu**.
- Při výpočtu rekurzivního výrazu, který necyklí, se výpočet pohybuje "po spirále" a **nevyhnutelně** spěje k jejímu konci.

## Demonstrace

```
length [4,3,2,1]
 = 1 + length [3,2,1]
 = 1 + 1 + length [2,1]
 = 1 + 1 + 1 + length [1]
 = 1 + 1 + 1 + 1 + length []
 = 1 + 1 + 1 + 1 + 0
 = 4
```



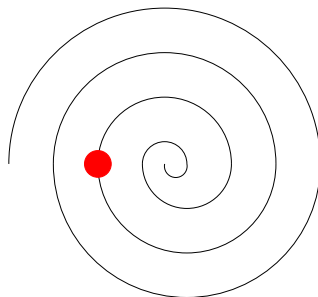


## Pozorování

- Rekurze se někdy představuje jako definice kruhem. Lépe je však představit si rekurzi jako **spirálu**.
- Při výpočtu rekurzivního výrazu, který necyklí, se výpočet pohybuje "po spirále" a **nevyhnutelně** spěje k jejímu konci.

## Demonstrace

```
length [4,3,2,1]
 = 1 + length [3,2,1]
 = 1 + 1 + length [2,1]
 = 1 + 1 + 1 + length [1]
 = 1 + 1 + 1 + 1 + length []
 = 1 + 1 + 1 + 1 + 0
 = 4
```

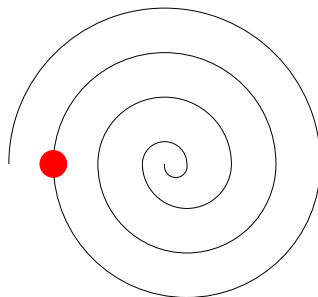


## Pozorování

- Rekurze se někdy představuje jako definice kruhem. Lépe je však představit si rekurzi jako **spirálu**.
- Při výpočtu rekurzivního výrazu, který necyklí, se výpočet pohybuje "po spirále" a **nevyhnutelně** spěje k jejímu konci.

## Demonstrace

```
length [4,3,2,1]
 = 1 + length [3,2,1]
 = 1 + 1 + length [2,1]
 = 1 + 1 + 1 + length [1]
 = 1 + 1 + 1 + 1 + length []
 = 1 + 1 + 1 + 1 + 0
 = 4
```

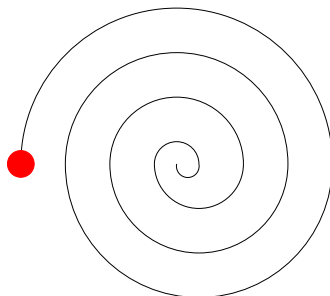


## Pozorování

- Rekurze se někdy představuje jako definice kruhem. Lépe je však představit si rekurzi jako **spirálu**.
- Při výpočtu rekurzivního výrazu, který necyklí, se výpočet pohybuje "po spirále" a **nevyhnutelně** spěje k jejímu konci.

## Demonstrace

```
length [4,3,2,1]
 = 1 + length [3,2,1]
 = 1 + 1 + length [2,1]
 = 1 + 1 + 1 + length [1]
 = 1 + 1 + 1 + 1 + length []
 = 1 + 1 + 1 + 1 + 0
 = 4
```



## Pozorování

- Uvědomění si toho, co udává vzdálenost od středu pomyslné spirály, je klíč k správnému použití rekurze.

## Rekurze ve funkci `length`

- Vzdálenost od středu odpovídá délce zbývajících částí seznamu.
- S každým dalším rekurzivním voláním funkce se seznam, který je argumentem funkce, zkracuje.
- Funkce `length` je tedy jednou nevyhnutelně volána pro prázdný seznam, což je volání, které rekurzi zastaví.

## 2 části definice

- Při definici rekurzivní funkce je nutné si uvědomit, co je **středem spirály**, tj. kde se má výpočet rekurzivní funkce zastavit, a **jak se k tomuto středu bude výpočet blížit**.

## Příklad – 2 části definice funkce length

- Ukončení rekurzivního výpočtu (střed spirály)  
`length [] = 0`
- Jedno rekurzivní volání (přiblížení se o "jednu otáčku")  
`length (x:s) = 1 + length s`

## Příklad – 2 části definice v jednom výrazu

- Obě části v jednom řádku definice  
`f1 :: Integer -> Integer`  
`f1 x = if (odd x) then x else f1 (x `div` 2)`

## Rekurzivní funkce a větvení

- V případě, že se výpočet funkce větví, vzdálenost od středu pomyslné spirály musí klesat s každou větví.
- Musí existovat větev, která rekurzi ukončuje a je proveditelná, pokud jsme ve středu pomyslné spirály.
- `f2 :: Integer -> Integer`  
`f2 x = if (x==0) then 0` - chyba, případ nemusí nastat  
`else if (odd x) then f2 (x-2)`  
`else f2 (x-1)`

## Funkce s nekonečnou rekurzí

- Teoreticky je možné použít rekurzi pro realizaci nekonečného cyklu. V praxi však toto řešení nemusí fungovat vzhledem k omezené velikosti paměti pro uchovávání návratových adres.

## Vzdálenost od středu

- To, že pomyslná vzdálenost od středu klesá, nemusí nutně znamenat, že datová struktura, se kterou rekurzivní funkce pracuje, se zmenšuje.

## Příklad

- Je-li cílem algoritmu opakovaným dělením celku dosáhnout určitého počtu dílků, počet dílků při každém dělení roste.
- Vzdálenost od středu pomyslné spirály lze v tomto případě identifikovat jako počet dělení, které zbývá k dosažení cílového počtu.
- Všimněme si, že pokud se při každém kroku zdvojnásobí počet dílků, jejich počet roste vzhledem k počtu rekurzivních kroků exponenciálně.

## Pozadí rekurze

- Struktura, podle níž se řídí rekurze, nemusí být spojena s úplným uspořádáním.
- Musí však být **dobře založená** (well-founded), což znamená, že v ní neexistuje nekonečně dlouhá klesající posloupnost prvků.

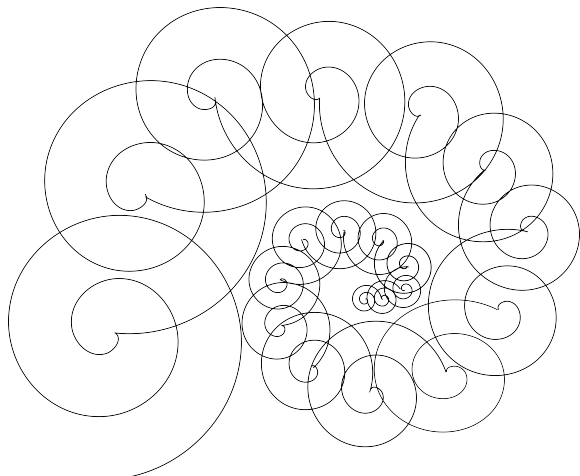
## Příklad

- Množina všech podmnožin dané množiny je pouze částečně uspořádána vzhledem k inkluzi, avšak postupné odebrání prvků z libovolné podmnožiny nevyhnutelně dospěje k prázdné množině.



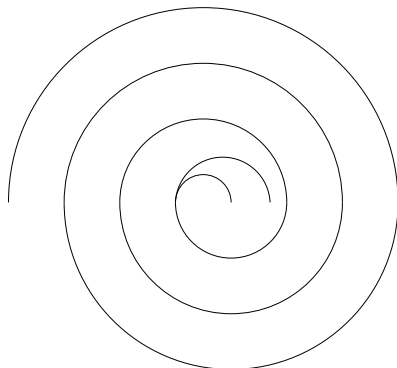
## Vnořená rekurze

- Rekurzivně volané funkce se mohou vnořovat.
- "Spirála spirál".



## Rozeklaná spirála

- Spirála je v místě dosažení středu rozeklaná, tj. končí ve dvou a více bázových případech.



## Rozeklaná spirála

- Spirála je v místě dosažení středu rozeklaná, tj. končí ve dvou a více bázových případech.



## Příklad

- Definujte funkci, která pro zadaný seznam vrátí seznam, který vznikne z původního seznamu vynecháním všech prvků na sudých pozicích.
- `oddMembers [1,2,3,4,5,6,7,8] ~>* [1,3,5,7]`
- `oddMembers "Trol ej ej schomoula." ~>* "To je cool."`

## Myšlenka a definice

- Rekurzivní volání zkracuje zadaný seznam vždy o dva prvky.
- Krajními případy jsou **prázdný** a **jednoprvkový** seznam.

- `oddMembers :: [a] -> [a]`  
`oddMembers [] = []`  
`oddMembers (x:[]) = [x]`  
`oddMembers (x:y:s) = x : oddMembers s`

## Rekurzivní datové struktury

## Pozorování

- Pro definici rekurzivních datových struktur (hodnot rekurzivních typů) platí podobná pravidla jako pro definice rekurzivních funkcí.

## Opačný směr

- Vytváření hodnot rekurzivního datového typu probíhá od středu pomyslné spirály směrem ven.
- Rekurzivní datová struktura má **základní** (bázovou) **hodnotu**.
- Základní hodnota je rozvíjena **rekurzivním pravidlem**.

## Klasický pohled na seznam

- Prázdná, konečná, případně nekonečná posloupnost prvků stejného typu.

## Rekurzivní pohled na seznam

- `[]` je **seznam**.
- `( a : seznam )` je **seznam**.

## Demonstrace

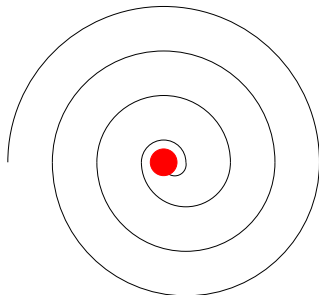
**[ ]**

`[1]` = 1 : `[]`

`[2,1]` = 2 : `[1]`

`[3,2,1]` = 3 : `[2,1]`

`[4,3,2,1]` = 4 : `[3,2,1]`



## Klasický pohled na seznam

- Prázdná, konečná, případně nekonečná posloupnost prvků stejného typu.

## Rekurzivní pohled na seznam

- `[]` je **seznam**.
- `( a : seznam )` je **seznam**.

## Demonstrace

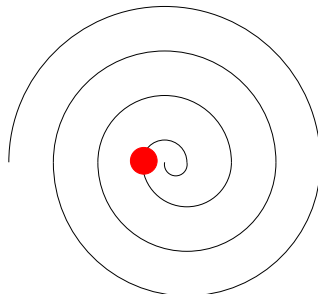
`[]`

`[1] = 1 : []`

`[2,1] = 2 : [1]`

`[3,2,1] = 3 : [2,1]`

`[4,3,2,1] = 4 : [3,2,1]`





## Klasický pohled na seznam

- Prázdná, konečná, případně nekonečná posloupnost prvků stejného typu.

## Rekurzivní pohled na seznam

- `[]` je **seznam**.
- `( a : seznam )` je **seznam**.

## Demonstrace

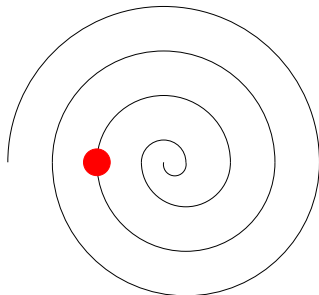
`[]`

`[1] = 1 : []`

`[2,1] = 2 : [1]`

`[3,2,1] = 3 : [2,1]`

`[4,3,2,1] = 4 : [3,2,1]`



## Klasický pohled na seznam

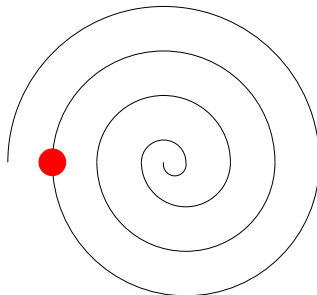
- Prázdná, konečná, případně nekonečná posloupnost prvků stejného typu.

## Rekurzivní pohled na seznam

- `[]` je **seznam**.
- `( a : seznam )` je **seznam**.

## Demonstrace

```
[]
[1] = 1 : []
[2,1] = 2 : [1]
[3,2,1] = 3 : [2,1]
[4,3,2,1] = 4 : [3,2,1]
```



## Klasický pohled na seznam

- Prázdná, konečná, případně nekonečná posloupnost prvků stejného typu.

## Rekurzivní pohled na seznam

- `[]` je **seznam**.
- `( a : seznam )` je **seznam**.

## Demonstrace

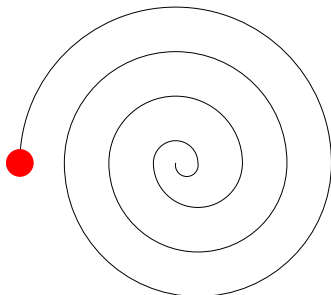
`[]`

`[1] = 1 : []`

`[2,1] = 2 : [1]`

`[3,2,1] = 3 : [2,1]`

`[4,3,2,1] = 4 : [3,2,1]`



## Pozorování

- Rekurzivní nahlížení na seznam se může jevit jen jako mentální hříčka.

## Stromy jako rekurzivní datové struktury

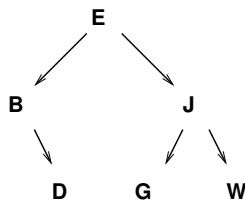
- Mnoho problémů je přirozené řešit s využitím jiné rekurzivně definované datové struktury – **binárního stromu**.
- Nelineární rekurzivní datová struktura.

## Rekurzivní definice binárního stromu

- Prázdný strom je **binární strom**
- Hodnota  $a$  a k ní asociovaný levý a pravý **binární strom** je **binární strom**

## Příklad

- Graficky zadaný binární strom.
- E označujeme jako **kořen** stromu
- E, B a J jsou **vnitřní vrcholy** stromu
- D, G a W označujeme jako **listy**
- Levý a pravý binární strom asociovaný s danou hodnotou označujeme jako levý a pravý **podstrom**.
- Binární stromy asociované k hodnotám D, G, W a levý podstrom asociovaný s hodnotou B jsou prázdné stromy.



## Definice datového typu `BinTree a`

```
data BinTree a = Empty | Node a (BinTree a) (BinTree a)
```

## Příklady hodnot definovaného typu

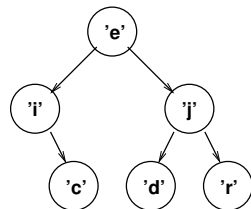
```
tc :: BinTree Char
```

```
tc = Node 'e'
```

```
 (Node 'i' Empty (Node 'c' Empty Empty))
```

```
 (Node 'j' (Node 'd' Empty Empty)
```

```
 (Node 'r' Empty Empty))
```



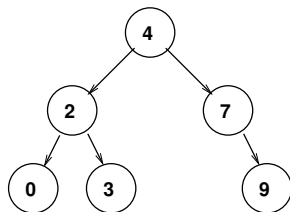
```
tn :: BinTree Int
```

```
tn = Node 4
```

```
 (Node 2 (Node 0 Empty Empty)
```

```
 (Node 3 Empty Empty))
```

```
 (Node 7 Empty (Node 9 Empty Empty))
```



## Problém

- Chceme definovat funkci, která při aplikaci na hodnotu typu `BinTree Int` zvýší o jedna všechny hodnoty uložené v uzlech stromu.

## Jak takovou funkci definovat?

- Výčtem hodnot nelze – možných hodnot je nekonečně mnoho.

```
treeP1' :: Num a => BinTree a -> BinTree a
treeP1' Empty = Empty
treeP1' (Node x Empty Empty) = Node (x+1) Empty Empty
⋮
```

- **Rekurzivně**, rekurzi vedeme podle struktury stromu

```
treeP1 :: Num a => BinTree a -> BinTree a
treeP1 Empty = Empty
treeP1 (Node x left right)
 = Node (x+1) (treeP1 left) (treeP1 right)
```

**Popis funkce** `treezipwith`

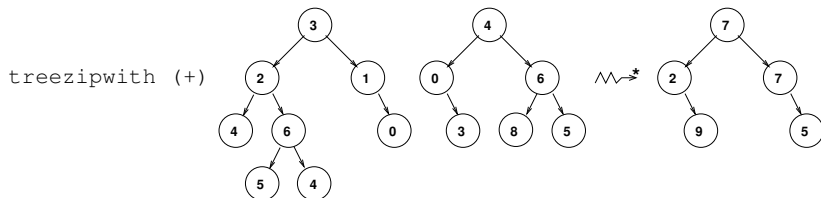
- Funkce `treezipwith` pomocí binární operace `op` vytvoří ze dvou stromů nový strom, jehož struktura bude průnikem obou stromů a v jehož uzlech budou výsledky aplikace operace `op` na hodnoty uzlů ze stejné pozice v obou stromech.



## Definice funkce treezipwith

- $\bullet$  `treezipwith :: (a -> b -> c) -> BinTree a -> BinTree b -> BinTree c`  
`treezipwith op (Node v1 l1 r1) (Node v2 l2 r2)`  
 $\quad = \text{Node } (v1 \text{ 'op' } v2) (\text{treezipwith op l1 l2})$   
 $\quad \quad \quad (\text{treezipwith op r1 r2})$   
`treezipwith _ _ _ = Empty`

## Příklad



## Pozorování

- V následujícím typu, nemá rekurzivní sestup pevnou aritu.

## Příklad

```
data Policie = Hlidka (String,String) | Oddeleni [Policie]
 deriving Show
```

```
h1 = Hlidka ("Pepa", "Emil")
h2 = Hlidka ("Jason", "Drson")
o1 = Oddeleni [h1, h2]
```

```
jmena :: Policie -> [String]
jmena (Hlidka (a,b)) = a:b:[]
jmena (Oddeleni []) = []
jmena (Oddeleni (x:s)) = jmena x ++ jmena (Oddeleni s)
```

# Dokazování rekurzivních programů

(pro chytré hlavičky)

## Fakta

- Ověřování správnosti navržených algoritmů je součástí práce programátora.
- Testování je nedokonalé.
- Správnost algoritmu můžeme prokázat například tím, že ji formálně (= s matematickou přesností) dokážeme.

## Důkaz korektnosti algoritmu

- Dokazujeme, že pokud výpočet algoritmu na platných vstupech skončí, tak algoritmus vrátí korektní výsledek. O algoritmu, který má tuto vlastnost říkáme, že je **částečně správný**.
- Pokud je algoritmus částečně správný a dokážeme, že na platných vstupech svůj výpočet vždy skončí, pak říkáme, že algoritmus je **úplně správný**.

## Pozorování

- Pro důkazy částečné správnosti i terminace rekurzivních funkcí se používá **matematická indukce**.

## Matematická indukce

- Matematická indukce je metoda dokazování tvrzení, která se používá, pokud chceme ukázat, že dané tvrzení platí pro všechny prvky dobře založené rekurzivně definované nekonečné posloupnosti. (Jako jsou například přirozená čísla.)

## Princip matematické indukce

- Ukážeme platnost tvrzení pro bázovou hodnotu.
- Ukážeme, že tvrzení se přenáší při aplikaci rekurzivního kroku.

$$\underline{T(0)} \text{ a } \underline{T(i) \Rightarrow T(i+1)} \implies T(0), T(1), T(2), \dots$$

## Pozorování

- Klíčovým problémem při použití matematické indukce je identifikace toho, podle čeho má být indukce vedena.
- Napovědět může místo rekurzivního volání funkce, neboť rekurse a matematická indukce spolu úzce souvisí.

## Příklad

- Dokažte, že pro každá dvě přirozená čísla  $x$  a  $y$  taková, že  $x > 0$  platí, že funkce `fpow` aplikovaná na argumenty  $x$  a  $y$  vrátí hodnotu  $x^y$ .
- `fpow :: Integer -> Integer -> Integer`  
`fpow x 0 = 1`  
`fpow x y = x * fpow x (y-1)`

## Pozorování

- Klíčovým problémem při použití matematické indukce je identifikace toho, podle čeho má být indukce vedena.
- Napovědět může místo rekurzivního volání funkce, neboť rekurse a matematická indukce spolu úzce souvisí.

## Příklad

- Dokažte, že pro každá dvě přirozená čísla  $x$  a  $y$  taková, že  $x > 0$  platí, že funkce `fpow` aplikovaná na argumenty  $x$  a  $y$  vrátí hodnotu  $x^y$ .
- `fpow :: Integer -> Integer -> Integer`  
`fpow x 0 = 1`  
`fpow x y = x * fpow x (y-1)`
- **Důkaz povedeme indukcí vzhledem k hodnotě  $y$ .**

## Bázový krok, T(0)

- Necht  $y=0$ , a necht  $x$  je libovolné.
- $x^y$  se redukuje dle  $x^0 = 1$  na hodnotu  $1$ .
- $x^0 = 1$ , pro libovolné  $x$ .
- Tudíž pro  $y = 0$  tvrzení platí.



## Indukční krok, $T(i) \Rightarrow T(i+1)$

- Dokazujeme, že pokud tvrzení platí pro hodnotu  $i$ , pak tvrzení platí i pro hodnotu  $i + 1$ . Platnost tvrzení pro hodnotu  $i$  se označuje jako **indukční předpoklad**.
- Platnost tvrzení pro hodnotu  $i$  říká, že  $\text{fpow } x \ i \rightsquigarrow^* x^i$  pro libovolnou hodnotu  $x$ .
- $\text{fpow } x \ (i+1)$ 
  - $\rightsquigarrow x * \text{fpow } x \ (i+1-1)$
  - $\rightsquigarrow x * \text{fpow } x \ i \stackrel{\text{dleIP}}{=} x * x^i$
  - $\rightsquigarrow x^{i+1}$
- Ukázali jsme, že pokud tvrzení platí pro  $i$ , pak platí i pro  $i + 1$ .
- Z platnosti báze a vlastností matematické indukce plyne, že pro libovolnou hodnotu  $x$  tvrzení platí pro všechny hodnoty  $y$ .

## Věta 1

- Jsou-li  $s$ ,  $t$  dva konečné seznamy stejného typu a délek, pak

$$\text{length } (s ++ t) = (\text{length } s) + (\text{length } t).$$

- Důkaz veden indukci podle délky seznamu  $s$ .

## Věta 2

- Pro každé tři seznamy  $s$ ,  $t$ ,  $u$  platí rovnost

$$(s ++ t) ++ u = s ++ (t ++ u).$$

- Důkaz veden indukci podle délky seznamu  $s$ .

## Věta 3

- Pro každý seznam  $s$  a celé číslo  $m \geq 0$  platí

$$\text{take } m \ s ++ \text{drop } m \ s = s.$$

- Důkaz veden indukci podle  $m$ .

## Měřítko „vzdálenosti“ rekurze

- Jaká vlastnost čísla  $x$  určuje hloubku rekurze při volání následující funkce?

```
f1 x = if (odd x) then x else f1 (x 'div' 2)
```

## Ternární stromy

- Zdefinujte nový datový typ, který odpovídá ternárním stromům a naprogramujte funkci, která pro instanci takového stromu zjistí délku nejlevější větve.

# IB015 Neimperativní programování

Akumulační funkce, Typové třídy,  
Časová složitost

Jiří Barnat  
Libor Škarvada

## Akumulační funkce

## Pozorování

- Seznam je posloupnost oddělených prvků.
- Motivací akumulčních funkcí je “spojit” jednotlivé prvky seznamu dohromady, tj. akumulovat informaci uloženou v těchto jednotlivých prvcích do jedné hodnoty.
- Počet prvků seznamu je variabilní, proto se tato akumulace realizuje pomocí binárního operátoru postupně.

## Spojení hodnot v seznamu pomocí binární operace

$$\text{foldl1 } \oplus [x_1, x_2, \dots, x_n] \rightsquigarrow^* ((\dots (x_1 \oplus x_2) \dots) \oplus x_{n-1}) \oplus x_n$$

$$\text{foldr1 } \oplus [x_1, x_2, \dots, x_n] \rightsquigarrow^* x_1 \oplus (x_2 \oplus (\dots (x_{n-1} \oplus x_n) \dots))$$

## Příklady použití

```
foldl1 (*) [1,2,3,4,5] ~> ... ~> 120
```

```
foldl1 (&&) [True, True, True, False, True] ~> ... ~> False
```

```
foldl1 (-) [2,3,2] ~> ... ~> -3
```

```
foldr1 (-) [2,3,2] ~> ... ~> 1
```

```
foldr1 (min) [18,12,23] ~> ... ~> 12
```

## Funkce `foldl1`, `foldr1` nejsou definovány pro `[]`

```
foldl1 (*) [] ~> ERROR
```

```
foldr1 (&&) [] ~> ERROR
```

## Na jednoprvkových seznamech je to identita s kontrolou typu

```
foldr1 (*) [0] ~> 0
```

```
foldr1 (*) [1] ~> 1
```

```
foldr1 (*) [True] ~> ERROR
```

## Princip

- Akumulační funkce, které mají fungovat i na prázdných seznamech, vyžadují navíc **iniciální hodnotu** pro proces akumulace.
- Směr závorkování určuje i místo použití iniciální hodnoty.

## Akumulace hodnot s využitím iniciální hodnoty

$$\text{foldl } \oplus \ v \ [x_1, x_2, \dots, x_n] \rightsquigarrow^* \left( \left( \dots \left( (v \oplus x_1) \oplus x_2 \right) \dots \right) \oplus x_{n-1} \right) \oplus x_n$$

$$\text{foldr } \oplus \ v \ [x_1, x_2, \dots, x_n] \rightsquigarrow^* x_1 \oplus (x_2 \oplus (\dots (x_{n-1} \oplus (x_n \oplus v)) \dots))$$



## Příklady

```
foldl (*) 0 [1,2,3,4,5] ~> ... ~> 0
```

```
foldl (&&) False [True, True, True, True] ~> ... ~> False
```

```
foldl (-) 0 [2,3,2] ~> ... ~> -7
```

```
foldr (-) 0 [2,3,2] ~> ... ~> 1
```

## Aplikace na prázdné seznamy

```
foldl max 100 [] ~> ... ~> 100
```

```
foldr (++) "Nic" [] ~> ... ~> "Nic"
```

## Výsledek může být opět seznam!

```
foldr (:) [] "Coze?" ~> ... ~> "Coze?"
```

```
foldr (\x y->(x+1):y) [100] [1,2,3] ~> ... ~> [2,3,4,100]
```

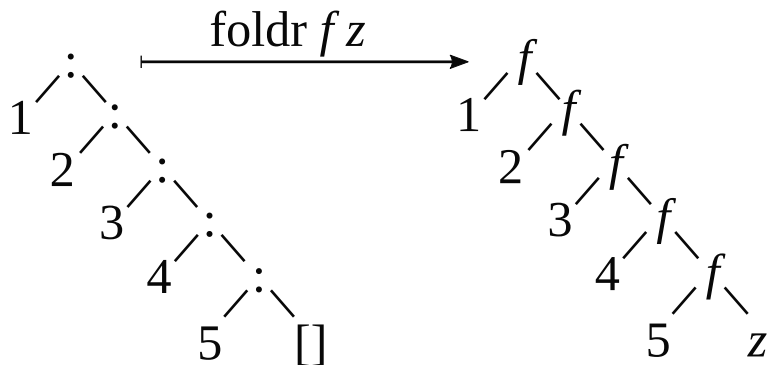
# Definice akumuláčnických funkcí

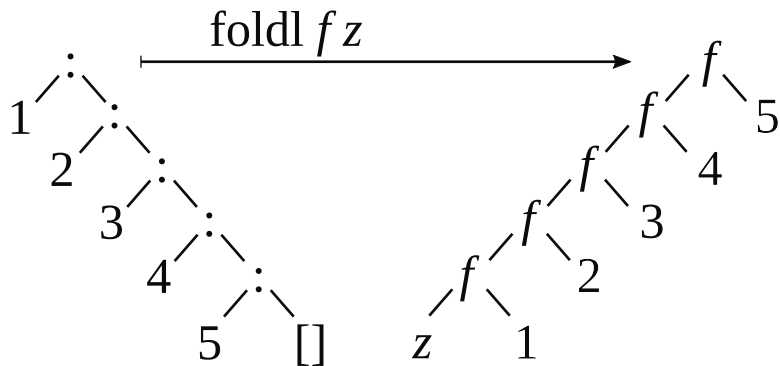
```
foldl :: (a -> b -> a) -> a -> [b] -> a
foldl _ v [] = v
foldl op v (x:s) = foldl op (v 'op' x) s
```

```
foldr :: (a -> b -> b) -> b -> [a] -> b
foldr _ v [] = v
foldr op v (x:s) = x 'op' foldr op v s
```

```
foldl1 :: (a -> a -> a) -> [a] -> a
foldl1 op (x:s) = foldl op x s
```

```
foldr1 :: (a -> a -> a) -> [a] -> a
foldr1 _ [x] = x
foldr1 op (x:s) = x 'op' foldr1 op s
```





## Katamorfismus

- Výraz vzniklý nahrazením hodnotových konstruktorů v nějaké hodnotě algebraického typu jinými funkcemi vhodné arity.
- Nově vzniklý výraz je následně možné vyhodnotit (pokud lze).

## Katamorfismus na seznamech

- Realizován funkcí `foldr`.
- Porovnejte typy hodnotových konstruktorů seznamu

`(:)` :: `a -> [a] -> [a]`

`[]` :: `[a]`

s typem funkce `foldr`

`foldr` :: `(a -> b -> b) -> b -> [a] -> b`

## Peanova čísla

- `data Nat = Succ Nat | Zero`

## Katamorfismus na typu Nat

- `natFold :: (a -> a) -> a -> Nat -> a`  
`natFold s z (Succ n) = s (natFold s z n)`  
`natFold s z Zero = z`

## Příklad

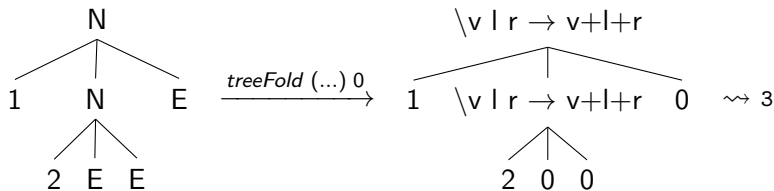
- Katamorfismus: `Zero → 0`  
`Succ → (1+)`
- `natFold (1+) 0 (Succ (Succ Zero))  $\rightsquigarrow^*$  (1+) ((1+) 0)  $\rightsquigarrow^*$  2`



## Fold na binárních stromech

- `data BinTree a = Node a (BinTree a) (BinTree a) | Empty`
- `let tree = Node 1 (Node 2 Empty Empty) Empty in  
treeFold (\v l r -> v+l+r) 0 tree  
 $\rightsquigarrow^*$  1+(2+0+0)+0  $\rightsquigarrow^*$  3`

## Graficky:





## Typové třídy

## Monomorfní typy

- `not :: Bool -> Bool`  
`(&&) :: Bool -> Bool -> Bool`

## Polymorfní typy

- `length :: [a] -> Int`  
`flip :: (a -> b -> c) -> b -> a -> c`

## Kvalifikované typy

- `(==), (/=) :: Eq a => a -> a -> Bool`  
`sum, product :: Num a => [a] -> a`  
`minimum, maximum :: Ord a => [a] -> a`  
`print :: Show a => a -> IO ()`

## Typové třídy

- Sdružují a identifikují typy se společnými vlastnostmi.
- Typová kvalifikace – `Ord`, `Nat`, `Eq`, `Show`, `Foldable`, ...

## Programátorský význam

- Existence typových tříd umožňuje i ve striktně typovaných jazycích sdílet kód funkcí, které dělají totéž, avšak pracují s hodnotami různých typů.
- Sdílení kódu funkcí, které dělají totéž, by měl být **svatý grál** všech programátorů.



## Typová třída Eq

- `class Eq a where`  
    `(==), (/=) :: a -> a -> Bool`  
    `x /= y = not (x == y)`

## Přidružení typů k typové třídě (deklarace instance)

- `instance Eq Bool where`  
    `False == False = True`  
    `True == True = True`  
    `_ == _ = False`
- `instance Eq Int where`  
    `(==) = primEqInt`
- `instance (Eq a, Eq b) => Eq (a,b) where`  
    `(x,y) == (u,v) = x == u && y == v`

## Typová třída Ord využívající typovou třídu Eq

- `class (Eq a) => Ord a where`  
    `(<=), (>=), (<), (>) :: a -> a -> Bool`  
    `max, min :: a -> a -> a`  
    `x >= y = y <= x`  
    `x < y = x <= y && x /= y`  
    `x > y = y < x`  
    `max x y = if x >= y then x else y`  
    `min x y = if x <= y then x else y`

## Deklarace instance

- `instance Ord Bool where`  
    `False <= _ = True`  
    `_ <= True = True`  
    `_ <= _ = False`
- `instance (Ord a, Ord b) => Ord (a,b) where`  
    `(x,y) <= (u,v) = x < u || (x == u && y <= v)`

## Pozorování

- Instanciací lze přenést vlastnosti typu na složené typy.

## Příklad

- Rozšíření uspořadatelnosti hodnot typu na uspořadatelnost seznamů hodnot daného typu.
- ```
instance (Ord a) => Ord [a] where
  [] <= _ = True
  (_:_) <= [] = False
  (x:s) <= (y:t) = x < y || (x == y && s <= t)
```

Definice typové třídy

- `class` $[(C_1 a, \dots, C_k a) \Rightarrow] C a$
 $\left[\begin{array}{l} \text{where } op_1 :: typ_1 \\ \quad \vdots \\ op_n :: typ_n \\ \quad \left[\begin{array}{l} default_1 \\ \quad \vdots \\ default_m \end{array} \right] \end{array} \right]$

Deklarace instance

- `instance` $[(C_1 a_1, \dots, C_k a_k) \Rightarrow] C typ$
 $\left[\begin{array}{l} \text{where } valdef_1 \\ \quad \vdots \\ valdef_n \end{array} \right]$

Přetížení

- Má-li třída více než jednu instanci, jsou její funkce **přetíženy**.

Přetížení operací

- Jedna operace je pro několik různých typů operandů definována obecně různým způsobem.
- To, která definice operace se použije při výpočtu, závisí na typu operandů, se kterými operace pracuje.
- Srovnej s parametricky polymorfními operacemi, které jsou definovány jednotně pro všechny typy operandů.

Typová třída Num

- `class (Eq a, Show a) => Num a where`
 `(+), (-), (*) :: a -> a -> a`
 `negate, abs, signum :: a -> a`

Přetížení operací při deklaraci instancí

- `instance Num Int where`
 `(+) = primPlusInt`
 `⋮`
- `instance Num Integer where`
 `(+) = primPlusInteger`
 `⋮`
- `instance Num Float where`
 `(+) = primPlusFloat`
 `⋮`

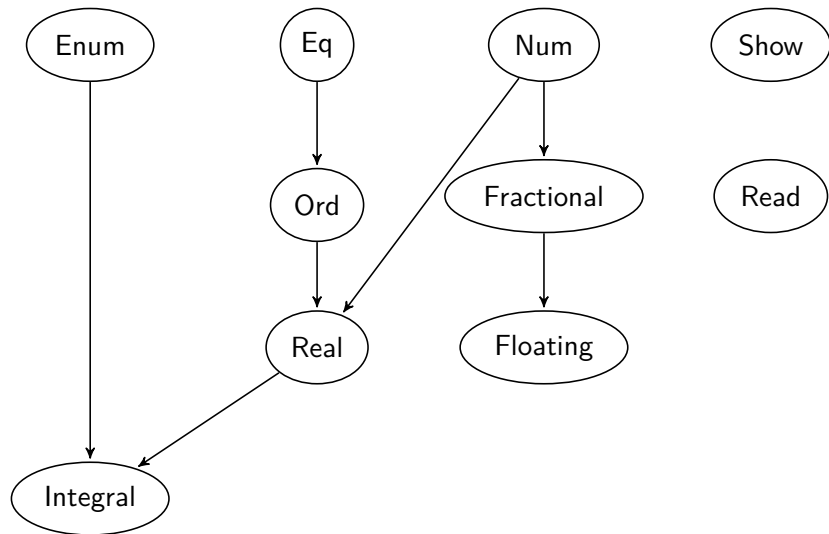
Implicitní deklarace instance

- V Haskellu lze deklarovat datový typ jako instanci typové třídy (nebo více typových tříd) též implicitně, pomocí klausule `deriving` v definici datového typu.
- Při implicitní deklaraci instance se požadované funkce definují automaticky podle způsobu zápisu hodnot definovaného typu
- Funkce `(==)` se při implicitní deklaraci instance realizuje jako syntaktická rovnost.

Příklad

- ```
data Nat = Zero | Succ Nat
 deriving (Eq, Show)
```

# Hierarchie základních typových tříd



## Definice typové třídy

- `class Boolable a where getBool :: a -> Bool`

## Instanciace

- `instance Boolable Bool where  
 getBool x = x`
- `instance Boolable Int where  
 getBool 0 = False  
 getBool _ = True`

## Použití

- `myIf :: Boolable a => a -> b -> b -> b  
 myIf x t f = if getBool x then t else f`
- `myIf (3-3) "Pravda" "Nepravda" ~\~>* "Nepravda"`
- `myIf (3-4) "Pravda" "Nepravda" ~\~>* "Pravda"`

# Časová složitost

## Podstata

- Časová složitost funkce popisuje **délku výpočtu** v nejhorším případě vzhledem k velikosti vstupních parametrů.

## Délka výpočtu v nejhorším případě

- Maximální počet redukčních kroků přes všechny možné výpočty aplikace programu na vstupní parametry stejné velikosti.

## Podstata

- Časová složitost funkce popisuje **délku výpočtu** v nejhorsím případě vzhledem k velikosti vstupních parametrů.

## Délka výpočtu v nejhorsím případě

- Maximální počet redukčních kroků přes všechny možné výpočty aplikace programu na vstupní parametry stejné velikosti.

**Na délce záleží!**



## Reverze seznamu funkce `reverse'`

- `reverse' :: [a] -> [a]`  
`reverse' [] = []`  
`reverse' (x:s) = reverse' s ++ [x]`
- `(++) :: [a] -> [a] -> [a]`  
`[] ++ t = t`  
`(x:s) ++ t = x : (s++t)`

## Reverze seznamu funkce `reverse`

- `reverse :: [a] -> [a]`  
`reverse = rev []`  
    where `rev s [] = s`  
          `rev s (x:t) = rev (x:s) t`



# Reverse seznamu funkcí reverse'

reverse' :: [a] -> [a]

reverse' [] = []

reverse' (x:s) = reverse' s ++ [x]

(++) :: [a] -> [a] -> [a]

[] ++ t = t

(x:s) ++ t = x : (s++t)

```
reverse' [1,2,3]
~> reverse' [2,3] ++ [1]
~> (reverse' [3] ++ [2]) ++ [1]
~> ((reverse' [] ++ [3]) ++ [2]) ++ [1]
~> (([] ++ [3]) ++ [2]) ++ [1]
~> ([3] ++ [2]) ++ [1]
~> (3 : ([2] ++ [1])) ++ [1]
~> (3 : [2]) ++ [1]
~> 3 : ([2] ++ [1])
~> 3 : (2 : ([1] ++ []))
~> 3 : (2 : [1]) ≡ [3,2,1]
```

- Délka výpočtu funkce při aplikaci na seznam délky  $n$ .
- **$n+1$**

```
reverse' [1,2,3]
~> reverse' [2,3] ++ [1]
~> (reverse' [3] ++ [2]) ++ [1]
~> ((reverse' [] ++ [3]) ++ [2]) ++ [1]
~> (([] ++ [3]) ++ [2]) ++ [1]

~> ([3] ++ [2]) ++ [1]

~> (3 : ([] ++ [2])) ++ [1]
~> (3 : [2]) ++ [1]

~> 3 : ([2] ++ [1])
~> 3 : (2 : ([] ++ [1]))
~> 3 : (2 : [1])
```

- Délka výpočtu funkce při aplikaci na seznam délky  $n$ .
- $n+1 + 1$

```
reverse' [1,2,3]
↪ reverse' [2,3] ++ [1]
↪ (reverse' [3] ++ [2]) ++ [1]
↪ ((reverse' [] ++ [3]) ++ [2]) ++ [1]
↪ (([] ++ [3]) ++ [2]) ++ [1]
↪ ((3) ++ [2]) ++ [1]
↪ (3 : ([] ++ [2])) ++ [1]
↪ (3 : [2]) ++ [1]
↪ 3 : ([2] ++ [1])
↪ 3 : (2 : ([] ++ [1]))
↪ 3 : (2 : [1])
```

- Délka výpočtu funkce při aplikaci na seznam délky  $n$ .
- $n+1 + 1 + 2$

```
reverse' [1,2,3]
↪ reverse' [2,3] ++ [1]
↪ (reverse' [3] ++ [2]) ++ [1]
↪ ((reverse' [] ++ [3]) ++ [2]) ++ [1]
↪ (([] ++ [3]) ++ [2]) ++ [1]

↪ ([3] ++ [2]) ++ [1]

↪ (3 : ([] ++ [2])) ++ [1]
↪ (3 : [2]) ++ [1]

↪ 3 : ([2] ++ [1])
↪ 3 : (2 : ([] ++ [1]))
↪ 3 : (2 : [1])
```

- Délka výpočtu funkce při aplikaci na seznam délky  $n$ .
- $n+1 + 1 + 2 + 3 + \dots + n$

```
reverse' [1,2,3]
~> reverse' [2,3] ++ [1]
~> (reverse' [3] ++ [2]) ++ [1]
~> ((reverse' [] ++ [3]) ++ [2]) ++ [1]
~> (([] ++ [3]) ++ [2]) ++ [1]

~> ([3] ++ [2]) ++ [1]

~> (3 : ([] ++ [2])) ++ [1]
~> (3 : [2]) ++ [1]

~> 3 : ([2] ++ [1])
~> 3 : (2 : ([] ++ [1]))
~> 3 : (2 : [1])
```

- Délka výpočtu funkce při aplikaci na seznam délky  $n$ .
- $n+1 + 1 + 2 + 3 + \dots + n$

```
reverse' [1,2,3]
~> reverse' [2,3] ++ [1]
~> (reverse' [3] ++ [2]) ++ [1]
~> ((reverse' [] ++ [3]) ++ [2]) ++ [1]
~> (([] ++ [3]) ++ [2]) ++ [1]

~> ([3] ++ [2]) ++ [1]

~> (3 : ([2] ++ [1])) ++ [1]
~> (3 : [2]) ++ [1]

~> 3 : ([2] ++ [1])
~> 3 : (2 : ([1] ++ []))
~> 3 : (2 : [1])
```

```
reverse :: [a] -> [a]
```

```
reverse = rev []
```

```
 where rev s [] = s
```

```
 rev s (x:t) = rev (x:s) t
```

```
reverse [1,2,3]
```

```
 ~> rev [] [1,2,3]
```

```
 ~> rev [1] [2,3]
```

```
 ~> rev [2,1] [3]
```

```
 ~> rev [3,2,1] []
```

```
 ~> [3,2,1]
```

- Délka výpočtu funkce při aplikaci na seznam délky  $n$ .
- **1**

```
reverse [1,2,3]
~> rev [] [1,2,3]
~> rev [1] [2,3]
~> rev [2,1] [3]
~> rev [3,2,1] []
~> [3,2,1]
```



- Délka výpočtu funkce při aplikaci na seznam délky  $n$ .
- $1 + n$

```
reverse [1,2,3]
~> rev [] [1,2,3]
~> rev [1] [2,3]
~> rev [2,1] [3]
~> rev [3,2,1] []
~> [3,2,1]
```

- Délka výpočtu funkce při aplikaci na seznam délky  $n$ .
- $1 + n + 1$

```
reverse [1,2,3]
~> rev [] [1,2,3]
~> rev [1] [2,3]
~> rev [2,1] [3]
~> rev [3,2,1] []
~> [3,2,1]
```

- Délka výpočtu funkce při aplikaci na seznam délky  $n$ .
- $1 + n + 1$

```
reverse [1,2,3]
~> rev [] [1,2,3]
~> rev [1] [2,3]
~> rev [2,1] [3]
~> rev [3,2,1] []
~> [3,2,1]
```

## Pozorování

- Při určování časové složitosti algoritmů je nepraktické a často i obtížné určovat tuto složitost přesně.
- Funkce vyjadřující délku výpočtu vzhledem k velikosti parametru klasifikujeme podle **asymptotického chování**.

## Asymptotický růst funkcí

- Při zápisu funkční hodnoty v proměnné  $n$  **rozhoduje nejrychleji rostoucí člen**. U něj navíc zanedbáváme kladnou multiplikační konstantu.
- Podle toho hovoříme o funkcích lineárních, kvadratických, exponenciálních apod.

# Přehled asymptotických funkcí

| <b>t(n)</b>                                                                                                                                 | <b>růst funkce t</b>                                                                      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1, 20, 729, $2^{64}$                                                                                                                        | konstantní                                                                                |
| $2 \log n + 5$ , $3 \log_2 n + \log_2(\log_2 n)$                                                                                            | logaritmický                                                                              |
| $n$ , $2n + 1$ , $n + \sqrt{n}$<br>$n \log n$ , $3n \log n + 6n + 9$<br>$n^2$ , $3n^2 + 4n - 1$ , $n^2 + 10 \log n$<br>$n^3$ , $n^3 + 3n^2$ | <i>lineární</i><br><i>n log n</i><br>polynomiální<br><i>kvadratický</i><br><i>kubický</i> |
| $2^n$<br>$\left(\frac{1+\sqrt{5}}{2}\right)^n$<br>$3^n$                                                                                     | exponenciální                                                                             |

## reverse'

- Počet redukčních kroků výrazu reverse'  $[x_1, \dots, x_n]$  na každém seznamu délky  $n$  je

$$n + 1 + 1 + 2 + 3 + \dots + n = \frac{n^2 + 3n + 2}{2}$$

Složitost funkce reverse' je **kvadratická** vzhledem k délce obráceného seznamu.

## reverse

- Počet redukčních kroků výrazu reverse  $[x_1, \dots, x_n]$  na každém seznamu délky  $n$  je

$$1 + n + 1 = n + 2$$

Složitost funkce reverse je **lineární** vzhledem k délce obráceného seznamu.

## Časová složitost algoritmu

- Posuzuje konkrétní algoritmus.
- Nevypovídá a jiných algoritmech pro řešení téhož problému.

## Časová složitost problému

- Daný problém je možné řešit různými algoritmy.
- Složitost problému vypovídá a časové složitosti nejlepšího možného algoritmu pro řešení problému.
- Určovat složitost problému je výrazně obtížnější, než určování složitosti algoritmu.
- Bez znalosti složitosti problému nelze určit, zda daný algoritmus pro řešení problému je optimální.

## Pozor

- Časová složitost popisuje délku výpočtu **v nejhorším případě** pro danou velikost argumentu.

## Příklad

- Vyšetřujeme časovou složitost funkce `ins` vzhledem k jejímu druhému parametru.
- Funkce `ins` zařazuje prvek do seřazeného seznamu.

```
ins :: Int -> [Int] -> [Int]
```

```
ins x [] = [x]
```

```
ins x (y:t) = if x <= y then x : y : t else y : ins x t
```



## Různé délky výpočtu

- Počet kroků při volání `ins x [x1, ..., xn]` je různý.

- Nejkratší výpočet má délku 3:

`ins 1 [2,4,6,8]`  $\rightsquigarrow^3$  `[1,2,4,6,8]`

- Nejdelší výpočet má délku  $3n + 1$ :

`ins 9 [2,4,6,8]`  $\rightsquigarrow^{3*4+1}$  `[2,4,6,8,9]`

## Časová složitost

- Časová složitost funkce `ins` je **lineární** vzhledem k velikosti jejího druhého argumentu (tj. vzhledem k délce seznamu).

## Pozorování

- Časová složitost závisí nejen na algoritmu (způsobu definování funkce), ale také na redukční strategii.

## Příklad

- Uvažme funkci pro uspořádání prvků v seznamu pomocí postupného zařazování.

```
insort :: Ord a => [a] -> [a]
insort = foldr ins []
 where ins x [] = [x]
 ins x (y:t) = if x <= y then x : y : t
 else y : ins x t
```

- Princip řazení funkcí `insort`

```
insort [x1, x2, ..., xn-1, xn]
 ~> foldr ins [] [x1, x2, ..., xn-1, xn]
 ~>n+1 ins x1 (ins x2 (... (ins xn-1 (ins xn []))...))
```





## Striktní vyhodnocování

- Počet redukčních kroků výrazu  $\text{minim } [x_1, \dots, x_n]$  je:

$$3 + n + 1 + \sum_{k=0}^{n-1} (3k + 1) + 1 = \frac{3n^2 + n + 10}{2}$$

- Při striktním vyhodnocování má funkce **kvadratickou** časovou složitost.

## Líné vyhodnocování

- Počet redukčních kroků výrazu  $\text{minim } [x_1, \dots, x_n]$  je:

$$3 + n + 1 + 1 + 3 \cdot (n - 1) + 1 = 4n + 3$$

- Při líném vyhodnocování má funkce **lineární** časovou složitost.

## Pozorování

- Není pravda, že časová složitost výpočtu se při líném a striktním vyhodnocování vždy liší.
- Pokud se časová složitost liší, může se lišit víc než o jeden řádek ve zmiňované tabulce asymptotických růstů funkcí.

## Příklady

- Konstantní (líně) versus exponenciální (striktně):

$$f\ n = \text{const } n \text{ (fib' } n)$$

- Lineární líně i striktně:

$$\text{length } [a_1, \dots, a_n]$$



## Obecný princip

- Vícenásobné nebo nevhodné použití rekurzivního volání v těle rekurzivně definované funkce, může v obecné rovině vést na časově neoptimální algoritmus.
- Opakovanému rekurzivnímu volání pro tutéž hodnotu lze zabránit uchováváním mezivýsledků rekurzivního volání.
- Uchování výsledků se provádí přidáním parametru rekurzivní funkce, tzv. **akumulátoru**.

## Pozorování

- Přímé použití rekurzivní funkce má tendenci být čitelnější.



## Definice funkcí

```
fib' :: Integer -> Integer
fib' 0 = 0
fib' 1 = 1
fib' n = fib' (n-2) + fib' (n-1)

fib :: Integer -> Integer
fib = f 0 1
 where f a _ 0 = a
 f a b k = f b (a+b) (k-1)
```

## Složitost vzhledem k argumentu

- Složitost funkce `fib'` je **exponenciální**.
- Složitost funkce `fib` je **lineární**.

## Analyzujte časovou složitost

- funkce `map`, vzhledem k délce seznamu.
- funkce `es` (Eratosthenovo síto) vzhledem k délce seznamu.

## Lineární vs. kvadratická

- Vytvořte libovolnou funkci `f1 :: a -> [a]`, která má kvadratickou složitost.
- Vytvořte libovolnou funkci `f2 :: a -> [a]`, která má lineární složitost.
- Použijte obě funkce v kontextu funkce `map` na dlouhých seznamech a pozorujte rozdíl.

# IB015 Neimperativní programování

## Práce se vstupy a výstupy

Jiří Barnat  
Libor Škarvada

## Úryvek diskuse mezi studenty

- ... *myslela jsem, že se budeme učit programovat ...*
- ... *zatím si jen hrajeme s nějakým blbým GHCi ...*
- ... *akorát obskurně zapisujeme funkce ...*

## Úryvek diskuse mezi studenty

- ... *myslela jsem, že se budeme učit programovat ...*
- ... *zatím si jen hrajeme s nějakým blbým GHCi ...*
- ... *akorát obskurně zapisujeme funkce ...*

**WTF ???**

## Úryvek diskuse mezi studenty

- ... *myslela jsem, že se budeme učit programovat ...*
- ... *zatím si jen hrajeme s nějakým blbým GHCi ...*
- ... *akorát obskurně zapisujeme funkce ...*

**WTF ???**

## Náplň dnešní lekce

- Jak realizovat komunikace mezi programem a jeho okolím.
- Napíšeme, přeložíme a spustíme první program v Haskellu.

## Samostaně spustitelný program

- **Posloupnost akcí**, při kterých dochází k interakci programu s okolním světem.

## Interakce s okolím programu

- Interakce s uživatelem skrze terminál.
- Manipulace se soubory, čtení a zápis do souboru.
- Interakce skrze grafické rozhraní.
- Komunikace s operačním systémem.
- ...

## Práce s interpretem

- Doposud naše programy v Haskellu žádné akce nepřipouštěly.
- Žádný pokyn k výpisu výsledku jsme do programu nekládali.
- GHCi může za to, že po skončení výpočtu se vypíše výsledná hodnota na terminál.

## Samostatný program

- Explicitní pokyny ke komunikaci s uživatelem.
- Při akci čtení vstupu z terminálu, se výpočet zastaví a čeká, až uživatel vloží text.
- Dochází k prokládání výpočtu, tak jak jsme jej znali doposud, a realizace vstup-výstupních akcí.



## Vstup/výstup

## Typování vstup-výstupních akcí

- Unární typový konstruktor **IO a** .
- Typy vytvořené pomocí typového konstruktoru `IO` mají jednu jedinou hodnotu, a to **vstup-výstupní akci**.
- Tato hodnota nemá textovou reprezentaci (nelze ji vypsat).

## Výstupní akce

- Výstupní akce mají typ **IO ()** .  
`putStrLn "Ahoj!":: IO ()`

## Vstupní akce

- Vstupní akce mají typ **IO a** , kde typová proměnná `a` nabývá hodnoty (typu) podle typu objektu, který vstupuje.  
`getLine :: IO String`

# Jak si představovat IO?

## Analogie

- Vstup/výstupní akci se představme jako krabici.
- Hodnota akce je vždycky stejná ... **krabice**.
- Ovšem obsah krabice je vnitřní výsledek akce.
- Obsah je určen typem, avšak může mít různé hodnoty.



7



**IO**

**Int**

**IO Int**

# Základní funkce pro výstup

`putChar :: Char -> IO ()`

- Zapiše znak na standardní výstup.

`putStr :: String -> IO ()`

- Zapiše řetězec na standardní výstup.

`putStrLn :: String -> IO ()`

- Zapiše řetězec na standardní výstup a přidá znak konec řádku.

`print :: Show a => a -> IO ()`

- Vypíše hodnotu jakéhokoliv tisknutelného typu na standardní výstup, a přidá znak konec řádku.
- Tisknutelné typy jsou instancí třídy `Show`.
- Uživatelem definované typy nutno označit přídomkem `deriving Show`.

# Základní funkce pro vstup

`getChar :: IO Char`

- Načte znak ze standardního vstupu.

`getLine :: IO String`

- Načte řádek ze standardního vstupu.

`getContents :: IO String`

- Čte veškerý obsah ze standardního vstupu jako jeden řetězec. Obsah je čten líně, tj. až když je potřeba.

`interact :: (String -> String) -> IO ()`

- Argumentem funkce `interact` je funkce, která zpracovává řetězec a vrací řetězec.
- Veškerý obsah ze standardního vstupu je předán této funkci a výsledek vytištěn na standardní výstup.

## Referenční transparentnost

- Daný výraz se vždy vyhodnotí na stejnou hodnotu, bez ohledu na okolí (kontext), ve kterém je použit.
- Programovací jazyk Haskell je referenčně transparentní.

## Dopady na vstup-výstupní chování

- **Nelze napsat program, který by zpracoval vstup uživatele a vyhodnotil se podle zadaného vstupu na různé hodnoty.**
- Lze napsat program, který zpracuje vstup a podle vstupu vypíše na výstup různé výsledky.
- Hodnoty předávané skrze vstup-výstupní akce nesouvisí s hodnotou výrazu, který tuto vstup-výstupní akci realizuje.

## Otázka

- Jestliže `getline` načte řetězec ze vstupu a přitom **má hodnotu vstup-výstupní akce**, což je hodnota typu `IO a`, konkrétně zde `IO String`, tak kde je ten načtený řetězec?

## Otázka

- Jestliže `getline` načte řetězec ze vstupu a přitom **má hodnotu vstup-výstupní akce**, což je hodnota typu `IO a`, konkrétně zde `IO String`, tak kde je ten načtený řetězec?

## Odpověď

- Načtený řetězec se uchová jako tzv. **vnitřní výsledek** provedení této vstupní akce.
- Skutečné načtení řetězce a zapamatování si vnitřního výsledku je realizováno jako **vedlejší efekt** vyhodnocení výrazu `getline`.



## Přístup k hodnotě vnitřního výsledku

- Pomocí binárního operátoru `>>=` .
- Ve výrazu `f >>= g` funguje operátor `>>=` tak, že vezme vnitřní výsledek vstupní akce `f` a na tento aplikuje unární funkci `g` , **jejímž výsledkem je ovšem vstup-výstupní akce.**
- Výraz `f >>= g` tedy znamená, že:

`f :: IO a`

`g :: a -> IO b`

`f >>= g :: IO b`

## Operátor >>=

- `(>>=) :: IO a -> ( a -> IO b ) -> IO b`
- Následující zápis je ekvivalentní:

`getLine >>= putStr`

`getLine >>= (\x -> putStr x)`

# Krabicová analogie pro operátor $\gg=$

$(\gg=) :: IO\ a \rightarrow (a \rightarrow IO\ b) \rightarrow IO\ b$

$f :: a \rightarrow IO\ b$



with  
a-val

$\gg=$

$f$



with  
b-val

## Otázka

- Operátor (>>=) nelze použít ke spojení vstup-výstupní akce a funkce, která není vstup-výstupní akce, proč?
- Příklad, **takto nelze**:

```
getLine >>= length
```

```
getLine >>= (\ x -> length x)
```

## Otázka

- Operátor (>>=) nelze použít ke spojení vstup-výstupní akce a funkce, která není vstup-výstupní akce, proč?
- Příklad, **takto nelze:**

```
getline >>= length
getline >>= (\ x -> length x)
```

## Odpověď

- Hodnota výrazu je závislá na zadaném vstupu!
- Porušuje referenční transparentnost.
- Typově nesprávně. **„Jakmile jste v IO , nelze utéct“**.
- Správné použití:

```
getline >>= print . length
getline >>= (\ x -> print (length x))
```

## Funkce `return` jako vstupní akce

- Prázdná akce, jejíž provedení má za cíl pouze naplnit hodnotu vnitřního výsledku.

```
return :: a -> IO a
```

```
return ['A','h','o','j'] :: IO String
```

- Možné použití:

```
return ['A','h','o','j'] >>= putStr
```

## Funkce `return` jako výstupní akce

- Funkce `return`, může sloužit i jako výstupní akce, která nemá žádný efekt.

```
return :: a -> IO a
```

```
return () :: IO ()
```

## Funkce `pure`

- Alternativa k funkci `return`.
- Použití funkce `return` je vzhledem ke kontextu známého z imperativních programovacích funkcí částečně matoucí.

## Řazení akcí, operátor >>

- Binární operátor, který řadí vstup-výstupní akce.
- Zapomíná/ničí hodnotu vnitřního výsledku.
- Výraz má hodnotu poslední (druhé) vstup-výstupní akce.
- $(\gg) :: IO\ a \rightarrow IO\ b \rightarrow IO\ b$

## Jak se chovají následující programy?

- `putStr "Jeje" >> putChar '!'`
- `getLine >> putStr "nic"`
- `putStrLn "Napiš mi něco pěkného." >> getLine >>=`  
    `( \x -> putStr "Napsal jsi:" >> putStrLn x )`

## Dávkové spuštění akcí

- Máme-li seznam vstup-výstupních akcí **stejného typu**, lze funkce z tohoto seznamu spustit a provést jako dávku.

- `sequence :: [IO a] -> IO [a]`  
`sequence [] = return []`  
`sequence (a:s) = do x<-a`  
`t <- sequence s`  
`return (x:t)`

## Příklady použití

- V případě výstupních akcí je výsledkem vyhodnocení výrazu posloupnost výstupů, viz:

```
sequence [putStr "Ahoj", putStr " ", putStr "světe!"]
```

- V případě vstupních akcí, je výsledkem vyhodnocení výrazu seznam vstupů, který je uložený jako vnitřní výsledek vstup-výstupní akce, viz:

```
sequence [getLine, getLine, getLine] >>= print
```

## Mapování IO akce na seznam argumentů

- Aplikuje unární vstup-výstupní akci na seznam hodnot a vzniklý **seznam vstup-výstupních akcí provede**.

```
mapM :: (a -> IO b) -> [a] -> IO [b]
```

```
mapM f = sequence . map f
```

## Příklady použití

- `mapM putStr ["Den","Noc"]`  
vypíše `DenNoc`
- `mapM (\t -> putStr "Aa") [1,2,3,4,5]`  
vypíše `AaAaAaAaAa`
- `mapM (\x -> getLine) "aa" >=> print`  
po zadání dvou řádků s obsahem `radek1` a `radek2`  
vypíše `["radek1","radek2"]`



```
type FilePath = String
```

- Definuje typový alias.

```
readFile :: FilePath -> IO String
```

- Načte obsah souboru jako řetězec. Soubor je čten líně.

```
writeFile :: FilePath -> String -> IO ()
```

- Zapiše řetězec do daného souboru (existující obsah smaže).
- Hodnoty jiného typu než `String` lze konvertovat funkcí `show`.

```
appendFile :: FilePath -> String -> IO ()
```

- Připíše řetězec do daného souboru.
- Hodnoty jiného typu než `String` lze konvertovat funkcí `show`.

## Pozorování

- Syntaktická konstrukce `do` slouží k alternativnímu zápisu výrazu s operátory `>>=` a `>>`.

## Následující zápis je ekvivalentní

- ```
putStr "vstup?" >>
  getLine      >>= \ x ->
  putStr "výstup?" >>
  getLine      >>= \ y ->
  readFile x   >>= \ z ->
  writeFile y (map toUpper z)
```

 |

```
do putStr "vstup?"
  x <- getLine
  putStr "výstup?"
  y <- getLine
  z <- readFile x
  writeFile y (map toUpper z)
```

Další předdefinované funkce

- Existuje řada dalších funkcí, jejich definice však nejsou automaticky zavedeny při startu programu, nebo interpretu.
- Tyto funkce jsou definovány v tzv. **modulech**.

Například

- `System.IO`
- `System.Directory`
- `System.Time`
- ...

Moduly

Modul v Haskellu

- Kolekce spolu souvisejících funkcí, typů a typových tříd.
- Program v Haskellu je tvořen hlavním modulem `Main`, který následně importuje a používá funkce z jiných modulů.
- `Prelude` je implicitně zavedený modul, který obsahuje definice funkcí, které jsme doposud běžně používali.
- Moduly umožňují **strukturovat kód projektu**, oddělit a případně později znovupoužívat ucelené části kódu.

Příklady předdefinovaných modulů

- Modul pro práci se seznamy – `Data.List`
- Modul pro práci se znaky – `Data.Char`
- Modul pro práci s komplexními čísly – `Data.Complex`
- ...

Použití modulu

- Před použitím funkcí a typů z modulu je třeba explicitně požádat o zavedení tohoto modulu, tzv. **importovat modul**.
- Klíčové slova `import` .

Možnosti importu

- Importovat pouze vybrané, nebo skrýt některé funkce modulu.
- Vynutit při použití funkce povinnou identifikaci modulu, v podobě `jméno_modulu.jméno_funkce` (tzv. kvalifikace).
- Přejmenovat kvalifikaci.

Příklady

- `import Data.Char`
- `import qualified Data.Char`
- `import qualified Data.Char as C`
- `import qualified Data.Char as C (toUpper)`
- `import qualified Data.Char as C hiding (toUpper)`

Pozorování

- Kvalifikace funkcí z modulů zavede nový význam znaku tečka.

Příklad

- ```
import qualified Data.Char as C
import System.Directory
main = getDirectoryContents ".." >>=
 print . map (\x -> (C.toUpper.head) x : tail x)
```

## Obecná definice

- `[ module Jméno [ (export1, ..., exportn) ] where ]`  
`[ import M1 [spec1] ]`  
`[       ⋮ ]`  
`[ import Mm [specm] ] ]`  
`[ globální_deklarace ]`

## Automatické doplnění definice Main

- **Není-li uvedena hlavička, doplní se**  
`module Main (main) where`
- **Nevyskytuje-li se mezi importovanými moduly  $M_1, \dots, M_m$  modul Prelude, doplní se**  
`import Prelude`



## Datový typ Fifo

- Datový kontejner (struktura, která uchovává prvky) přístupovaný operacemi **vlož prvek** a **vyber prvek**.
- Prvky jsou z datové struktury odebírány v tom pořadí, ve kterém byly vkládány.
- First-In-First-Out = FIFO
- Operace by měly mít konstantní časovou složitost.

## Realizace v Haskellu

- Definice modulu `Fifo`
- Použití modulu:

```
import Fifo
```

# Příklad Modulu – Datový typ Fifo

```
module Fifo (FifoTyp, emptyq, headq, enqueue, dequeue) where

data FifoTyp a = Q [a] [a]

emptyq :: FifoTyp a
emptyq = Q [] []

enqueue :: a -> FifoTyp a -> FifoTyp a
enqueue x (Q h t) = Q h (x:t)

headq :: FifoTyp a -> a
headq (Q (x:_) _) = x
headq (Q [] []) = error "headq: prázdná fronta"
headq (Q [] t) = headq (Q (reverse t) [])

dequeue :: FifoTyp a -> FifoTyp a
dequeue (Q (_:h) t) = Q h t
dequeue (Q [] []) = error "dequeue: prázdná fronta"
dequeue (Q [] t) = dequeue (Q (reverse t) [])
```

## Samostatně stojící programy

## Připomenutí

- Interpretace vs. kompilace kódu.
- Dosud jsme využívali interpret `ghci` .
- Kód lze přeložit do samostatně spustitelného programu.
- Překladač `ghc` .

## Výhody přeloženého kódu

- Přeložený kód je rychlejší než interpretovaný.
- Na cílovou platformu není třeba instalovat interpret, ani vývojové prostředí.

## Hlavní funkce – `main`

- Spustitelný program musí obsahovat funkci `main :: IO ()` .
- Funkce je automaticky spuštěna po zavedení programu do paměti.

## Nazdar světe

- `main = putStrLn "Čaute lidi!"`

## Překlad

- Kód umístěn v souboru `hello.hs` .
- Překlad pomocí `ghc hello.hs -o hello`
- Vytvořen spustitelný soubor `hello` .
- Vzniknou pomocné soubory `hello.hi` a `hello.o` , lze smazat.

## Změna typu

- Vstup/Výstup je obvykle realizován v objektech typu `String`.
- Převést objekty na řetězec a zpět je možné pomocí funkcí:

```
show :: Show a => a -> String
```

```
read :: Read a => String -> a
```

## Asymetrie použití

- Použití `show` a `read` není symetrické, při použití `read` je třeba uvést do jakého typu chceme řetězec transformovat.

```
show 123 ~>* "123"
```

```
read "123" ~>* ERROR
```

```
(read "123") :: Int ~>* 123
```

## Parsování vstupu

- Převedou se pouze 100% správně strukturované řetězce.

```
(read "[1,2,3]") :: [Char] ~>* ERROR
```

```
(read "[1,2,3]") :: [Int] ~>* [1,2,3]
```

```
(read "[1,2,3]") :: [Float] ~>* [1.0,2.0,3.0]
```

## Program plus1

- Tento program vyzve uživatele, aby zadal celé číslo, pak toto číslo přečte, převede na objekt typu `Int`, přičte jedničku a zvýšené číslo vytiskne.
- ```
main = do putStrLn "Napis cele cislo:"  
         x <- getLine  
         print (1 + read x::Int)
```

Užitečné konstrukce Haskellu

Pozorování

- Víceřádkové definice funkcí realizují větvení kódu.
- Více řádkovou definici lze ekvivalentně přepsat s využitím klíčového slova `case` .

Syntaktická konstrukce case

- ```
case expression of
 pattern1 -> expression1
 ...
 patternn -> expressionn
```
- Textové zarovnání vzorů je nutné.
- Všechny výrazy na pravých stranách musí být stejného typu.

## Úkol 1

- Definujte funkci `take` s využitím konstrukce `case` .

- Řešení:

```
take m ys = case (m,ys) of
 (0,_) -> []
 (_,[]) -> []
 (n,x:xs) -> x : take (n-1) xs
```

## Úkol 2

- Zapište pomocí `case` výraz `if e1 then e2 else e3` .

- Řešení:

```
case (e1) of True -> e2
 False -> e3
```

## Stráž

- Stráž je výraz typu Bool přidružený k definičnímu přiřazení.
- Při výpočtu bude tato definice funkce realizována, pouze pokud bude asociovaný výraz vyhodnocen na `True`.
- `function args`
  - | `guard1 = expression1`
  - ...
  - | `guardn = expressionn`
  - | `otherwise = default expression`

## Pozorování

- Konstrukce nerozšiřuje výrazové možnosti jazyka, ale je pohodlná (syntaktický cukr).

## Příklad 1

- `f x | (x>3) = "vetsi nez 3"`  
  `| (x>2) = "vetsi nez 2"`  
  `| (x>1) = "vetsi nez 1"`
- `f 2 ~>* "vetsi nez 1"`  
  `f 1 ~>* ERROR`

## Příklad 2

- `g (a:x)`  
  `| x==[]           = "Almost empty."`  
  `| x/=[]           = "At least 2 members."`  
  `| otherwise       = "Unreachable code."`  
  `g -               = "Nothingness."`
- `g [] ~>* "Nothingness."`  
  `g "Ahoj" ~>* "At least 2 members."`

## Pozorování

- Při vypisování typů programů pracujících s IO můžete narazit na typovou třídu `Monad`, která je zobezněním typu `IO`.

- Například:

```
(>>) :: Monad m => m a -> m b -> m b
```

- Monadické typy jsou v pokročilém Haskellu běžné, ale jsou za hranicí, která je stanovena pro tuto přednášku.
- Pro účely této přednášky je v pořádku otypovat pomocí `IO`:  

```
(>>) :: IO a -> IO b -> IO b
```

## Wanna more?

- **IB016 Seminář z funkcionálního programování**

## Vstup/výstup

- Napište program, který vyzve uživatele, aby zadal 16 čísel oddělených mezerou, a poté tato čísla vypíše v matici velikosti 4x4.
- Napište program, který ve vhodně formátovaném výstupu (např. rozbalený souborový strom) vypíše obsah aktuálního adresáře včetně všech jeho podúrovní.
- Vstup-výstupní programy vytvářejte jako samostatně spustitelné programy.



# IB015 Neimperativní programování

Ukázky funkcionálně řešených problémů

Jiří Barnat  
Libor Škarvada



## Prohledávání a prořezávání

Problém  $n$  dam

## Problém $n$ dam

- Rozestavit  $n$  šachových dam na pole čtvercové šachovnice  $n \times n$  tak, aby se žádné dvě dámy navzájem neohrožovaly.

## Všechna řešení pro $n = 4$

- |   |   |   |   |
|---|---|---|---|
|   | ♔ |   |   |
|   |   |   | ♔ |
| ♔ |   |   |   |
|   |   | ♔ |   |

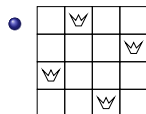
|   |   |   |   |
|---|---|---|---|
|   |   | ♔ |   |
| ♔ |   |   |   |
|   |   |   | ♔ |
|   | ♔ |   |   |

## Pozorování

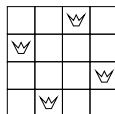
- V každém řádku/sloupku šachovnice může být nejvýše jedna dáma (jinak se ohrožují), a zároveň musí být alespoň jedna dáma, jinak bychom jich neumístili  $n$ .

## Kódování pozice

- Očíslujeme 1 až  $n$  řádky šachovnici směrem shora dolů a sloupce šachovnice směrem zleva doprava.
- Řešení budeme kódovat seznamy čísel a to tak, že čísla v seznamu určují pozice dam v odpovídajících sloupcích.



[3, 1, 4, 2]



[2, 4, 1, 3]

## Úkol

- Naprogramujte funkci `damy :: Int -> [[Int]]`, která pro zadané  $n$  vrátí seznam všech možných řešení.

## Postupné rozšiřování šachovnice

- Zavedeme funkci  $da\ m\ n :: Int \rightarrow Int \rightarrow [[Int]]$ , která bude počítat všechna řešení pro obdélníkovou matici s  $m$  sloupky a  $n$  řádky ( $m < n$ ).
- Nová funkce bude řešení počítat rekurzivně, a to s využitím řešení pro šachovnici s  $(m - 1)$  sloupky a  $n$  řádky.
- Šachovnice s nula sloupky, má jedno triviální řešení:  $[]$ , tj.  $da\ 0\ n = [[]]$ .

## Cesta k celkovému řešení

- $damy :: Int \rightarrow [[Int]]$   
 $damy\ n = da\ n\ n$

## Účel

- Rozhodnout, které pozice při rozšíření o jeden sloupek jsou při stávajícím rozložení dam nevyhovující.
- hrozba :: [Int] -> [Int]  
hrozba p = p ++ zipWith (+) p [1..] ++ zipWith (-) p [1..]

## Princip

- Předpokládejme stávající šachovnici, kterou rozšíříme zleva o jeden sloupek.
- 

| 1 | 2 | ... | m-1 |   |
|---|---|-----|-----|---|
|   |   |     |     | 1 |
|   |   |     |     | 2 |
|   |   |     |     | 3 |
|   |   |     |     | 4 |
|   |   |     |     | ⋮ |
|   |   |     |     | n |

## Účel

- Rozhodnout, které pozice při rozšíření o jeden sloupek jsou při stávajícím rozložení dam nevyhovující.
- `hrozba :: [Int] -> [Int]`  
`hrozba p = p ++ zipWith (+) p [1..] ++ zipWith (-) p [1..]`

## Princip

- Předpokládejme stávající šachovnici, kterou rozšíříme zleva o jeden sloupek.
- `hrozba` vrátí seznam ohrožených pozic.

|  | 0 | 1 | 2 | ... | m-1 |   |
|--|---|---|---|-----|-----|---|
|  |   |   |   |     |     | 1 |
|  |   |   |   |     |     | 2 |
|  |   |   |   |     |     | 3 |
|  |   |   |   |     |     | 4 |
|  |   |   |   |     |     | ⋮ |
|  |   |   |   |     |     | n |

## Účel

- Rozhodnout, které pozice při rozšíření o jeden sloupek jsou při stávajícím rozložení dam nevyhovující.
- hrozba :: [Int] -> [Int]  
hrozba p = p ++ zipWith (+) p [1..] ++ zipWith (-) p [1..]

## Princip

- Předpokládejme stávající šachovnici, kterou rozšíříme zleva o jeden sloupek.
- [4, , , ] [4, , , ] [4, , , ]

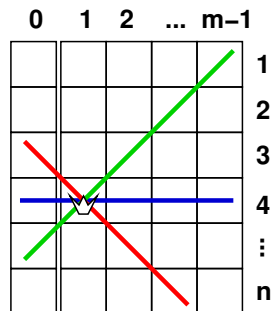
| 0 | 1 | 2 | ... | m-1 |   |
|---|---|---|-----|-----|---|
|   |   |   |     |     | 1 |
|   |   |   |     |     | 2 |
|   |   |   |     |     | 3 |
|   | ♔ |   |     |     | 4 |
|   |   |   |     |     | ⋮ |
|   |   |   |     |     | n |

## Účel

- Rozhodnout, které pozice při rozšíření o jeden sloupek jsou při stávajícím rozložení dam nevyhovující.
- hrozba :: [Int] -> [Int]  
hrozba p = p ++ zipWith (+) p [1..] ++ zipWith (-) p [1..]

## Princip

- Předpokládejme stávající šachovnici, kterou rozšíříme zleva o jeden sloupek.
- $[4, \ , \ , \ ]$     $[4, \ , \ , \ ]$     $[4, \ , \ , \ ]$   
                   $+ [1, 2, 3, 4]$     $- [1, 2, 3, 4]$   
-----  
 $[4, \ , \ , \ ]$     $[5, \ , \ , \ ]$     $[3, \ , \ , \ ]$



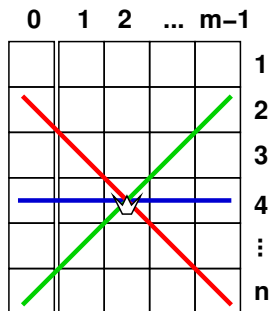


## Účel

- Rozhodnout, které pozice při rozšíření o jeden sloupec jsou při stávajícím rozložení dam nevyhovující.
- hrozba :: [Int] -> [Int]  
hrozba p = p ++ zipWith (+) p [1..] ++ zipWith (-) p [1..]

## Princip

- Předpokládejme stávající šachovnici, kterou rozšíříme zleva o jeden sloupek.
- $[ ,4, , ] \quad [ ,4, , ] \quad [ ,4, , ]$   
 $\quad \quad \quad +[1,2,3,4] \quad -[1,2,3,4]$   
-----  
 $[ ,4, , ] \quad [ ,6, , ] \quad [ ,2, , ]$

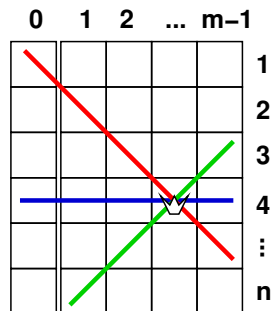


## Účel

- Rozhodnout, které pozice při rozšíření o jeden sloupek jsou při stávajícím rozložení dam nevyhovující.
- hrozba :: [Int] -> [Int]  
hrozba p = p ++ zipWith (+) p [1..] ++ zipWith (-) p [1..]

## Princip

- Předpokládejme stávající šachovnici, kterou rozšíříme zleva o jeden sloupek.
- $[ , ,4, ]$   $[ , ,4, ]$   $[ , ,4, ]$   
+ [1,2,3,4] - [1,2,3,4]  
-----  
 $[ , ,4, ]$   $[ , ,7, ]$   $[ , ,1, ]$

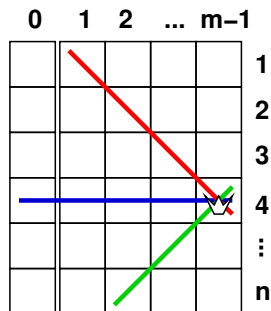


## Účel

- Rozhodnout, které pozice při rozšíření o jeden sloupec jsou při stávajícím rozložení dam nevyhovující.
- hrozba :: [Int] -> [Int]  
hrozba p = p ++ zipWith (+) p [1..] ++ zipWith (-) p [1..]

## Princip

- Předpokládejme stávající šachovnici, kterou rozšíříme zleva o jeden sloupek.
- $[ , , , 4] \quad [ , , , 4] \quad [ , , , 4]$   
 $\quad \quad \quad +[1,2,3,4] \quad -[1,2,3,4]$   
-----  
 $[ , , , 4] \quad [ , , , 8] \quad [ , , , 0]$



## Účel

- Rozhodnout, které pozice při rozšíření o jeden sloupek jsou při stávajícím rozložení dam nevyhovující.
- hrozba :: [Int] -> [Int]  
hrozba p = p ++ zipWith (+) p [1..] ++ zipWith (-) p [1..]

## Princip

- Předpokládejme stávající šachovnici, kterou rozšíříme zleva o jeden sloupek.
- [6,1,3,5] [6,1,3,5] [6,1,3,5]

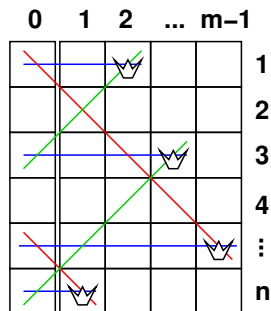
|  | 0 | 1 | 2 | ... | m-1 |   |
|--|---|---|---|-----|-----|---|
|  |   |   | ♔ |     |     | 1 |
|  |   |   |   |     |     | 2 |
|  |   |   |   | ♔   |     | 3 |
|  |   |   |   |     |     | 4 |
|  |   |   |   |     | ♔   | ⋮ |
|  | ♔ |   |   |     |     | n |

## Účel

- Rozhodnout, které pozice při rozšíření o jeden sloupec jsou při stávajícím rozložení dam nevyhovující.
- hrozba :: [Int] -> [Int]  
hrozba p = p ++ zipWith (+) p [1..] ++ zipWith (-) p [1..]

## Princip

- Předpokládejme stávající šachovnici, kterou rozšíříme zleva o jeden sloupec.
- $[6,1,3,5]$     $[6,1,3,5]$     $[6,1,3,5]$   
                   $+ [1,2,3,4]$     $- [1,2,3,4]$   
-----  
 $[6,1,3,5]$     $[-,3,6,-]$     $[5,-,-,1]$

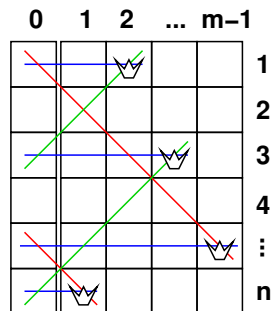


## Účel

- Rozhodnout, které pozice při rozšíření o jeden sloupec jsou při stávajícím rozložení dam nevyhovující.
- hrozba :: [Int] -> [Int]  
hrozba p = p ++ zipWith (+) p [1..] ++ zipWith (-) p [1..]

## Princip

- Předpokládejme stávající šachovnici, kterou rozšíříme zleva o jeden sloupek.
- $[6,1,3,5]$     $[6,1,3,5]$     $[6,1,3,5]$   
                   $+ [1,2,3,4]$     $- [1,2,3,4]$   
-----  
                   $[6,1,3,5]$     $[-,3,6,-]$     $[5,-,-,1]$
- Platné volné pozice: 2 a 4.



```
type Reseni = [Int]

damy :: Int -> [Reseni]
damy n = da n n

da :: Int -> Int -> [Reseni]
da 0 _ = [[]]
da m n = [k:p | p <- da (m-1) n, k <- [1..n], nh k p]
 where nh k p = k 'notElem' (p
 ++ zipWith (+) p [1..]
 ++ zipWith (-) p [1..])
```

## Backtracking, Prořezávání

- Backtracking – rekurzivní generování všech možných řešení.
- Prořezávání – časná eliminace neplatných řešení (zde realizováno funkcí `nh k p`).





## Nejmenší nepoužité přirozené číslo

(Richard Bird: Pearls of Functional Algorithm Design)

## Zadání

- Pro konečný seznam přirozených čísel zjistěte nejmenší přirozené číslo, které se v seznamu nevyskytuje.

## Řešení 1.

- Ze seznamu přirozených čísel "odečteme" zadaný seznam. Nejmenší číslo výsledného seznamu je hledané číslo.

```
minfree :: [Int] -> Int
minfree s = head ([0..] 'listminus' s)
```

- Pro odečtení jednoho seznamu od druhého si definujeme pomocnou funkci:

```
listminus :: Eq a => [a] -> [a] -> [a]
listminus u v = filter ('notElem' v) u
```

## Funkce `listminus`

- `listminus u v = filter ('notElem' v) u`
- `u = [0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,...]`  
`v = [9,8,7,6,5,4,3,2,1,0]`

## Funkce listminus

- `listminus u v = filter ('notElem' v) u`
- `u = [0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,...]`  
`v = [9,8,7,6,5,4,3,2,1,0]`

## Funkce listminus

- `listminus u v = filter ('notElem' v) u`
- `u = [0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,...]`     1  
   `v = [9,8,7,6,5,4,3,2,1,0]`

## Funkce listminus

- `listminus u v = filter ('notElem' v) u`
- `u = [0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,...]`    2
- `v = [9,8,7,6,5,4,3,2,1,0]`

## Funkce listminus

- `listminus u v = filter ('notElem' v) u`
- `u = [0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,...]`     3
- `v = [9,8,7,6,5,4,3,2,1,0]`

## Funkce `listminus`

- `listminus u v = filter ('notElem' v) u`
- `u = [0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,...]`      `length v`  
`v = [9,8,7,6,5,4,3,2,1,0]`



## Funkce listminus

- `listminus u v = filter ('notElem' v) u`
- `u = [0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,...]`      `length v+1`  
`v = [9,8,7,6,5,4,3,2,1,0]`

## Funkce listminus

- `listminus u v = filter ('notElem' v) u`
- `u = [0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,...]`      `length v+2`  
`v = [9,8,7,6,5,4,3,2,1,0]`

## Funkce listminus

- `listminus u v = filter ('notElem' v) u`
- `u = [0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,...]`      `length v+3`  
`v = [9,8,7,6,5,4,3,2,1,0]`

## Funkce listminus

- `listminus u v = filter ('notElem' v) u`
- `u = [0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,...]`      `length v + length v-1`  
`v = [9,8,7,6,5,4,3,2,1,0]`

## Funkce listminus

- `listminus u v = filter ('notElem' v) u`
- `u = [0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,...]` ...  
`v = [9,8,7,6,5,4,3,2,1,0]`

## Funkce `listminus`

- `listminus u v = filter ('notElem' v) u`
- `u = [0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,...]`  
`v = [9,8,7,6,5,4,3,2,1,0]`

## Vlastnosti řešení

- Délka výpočtu:  $\text{length } v + \text{length } v-1 + \text{length } v-2 + \text{length } v-3 + \dots$
- V nejhorším případě kvadratická časová složitost.

## Otázka

- Je možné problém řešit s lineární časovou složitostí?

## Pozorování

- Nejmenší číslo bude vždy v rozsahu  $\langle 0, \text{length}(v) \rangle$ .

## Idea lepšího řešení

- Uvažme tabulku, ve které je  $(\text{length } v + 1)$  hodnot `True` .
- Pro každé číslo  $v$  v zadaném seznamu přepíšeme na pozici určené tímto číslem hodnotu `True` na `False` , poté pozice prvního nepřepsaného `True` určuje hledané číslo.
- `[True ,True ,True ,True ,True ]`  
`[0,3,1,4]`

## Pozorování

- Nejmenší číslo bude vždy v rozsahu  $\langle 0, \text{length}(v) \rangle$ .

## Idea lepšího řešení

- Uvažme tabulku, ve které je  $(\text{length } v + 1)$  hodnot `True` .
- Pro každé číslo  $v$  v zadaném seznamu přepíšeme na pozici určené tímto číslem hodnotu `True` na `False` , poté pozice prvního nepřepsaného `True` určuje hledané číslo.
- [**False**,`True` ,`True` ,`True` ,`True` ]  
[**0**,3,1,4]



## Pozorování

- Nejmenší číslo bude vždy v rozsahu  $\langle 0, \text{length}(v) \rangle$ .

## Idea lepšího řešení

- Uvažme tabulku, ve které je  $(\text{length } v + 1)$  hodnot `True` .
- Pro každé číslo  $v$  v zadaném seznamu přepíšeme na pozici určené tímto číslem hodnotu `True` na `False` , poté pozice prvního nepřepsaného `True` určuje hledané číslo.
- [`False`, `True` , `True` , **`False`**, `True` ]  
[0, **3**, 1, 4]

## Pozorování

- Nejmenší číslo bude vždy v rozsahu  $\langle 0, \text{length}(v) \rangle$ .

## Idea lepšího řešení

- Uvažme tabulku, ve které je  $(\text{length } v + 1)$  hodnot `True` .
- Pro každé číslo  $v$  v zadaném seznamu přepíšeme na pozici určené tímto číslem hodnotu `True` na `False` , poté pozice prvního nepřepsaného `True` určuje hledané číslo.
- [`False`, **`False`**, `True` , `False`, `True` ]  
[0, 3, **1**, 4]

## Pozorování

- Nejmenší číslo bude vždy v rozsahu  $\langle 0, \text{length}(v) \rangle$ .

## Idea lepšího řešení

- Uvažme tabulku, ve které je  $(\text{length } v + 1)$  hodnot `True` .
- Pro každé číslo  $v$  v zadaném seznamu přepíšeme na pozici určené tímto číslem hodnotu `True` na `False` , poté pozice prvního nepřepsaného `True` určuje hledané číslo.
- [`False`,`False`,`True` ,`False`,**`False`**]  
[0,3,1,**4**]

## Pozorování

- Nejmenší číslo bude vždy v rozsahu  $\langle 0, \text{length}(v) \rangle$ .

## Idea lepšího řešení

- Uvažme tabulku, ve které je  $(\text{length } v + 1)$  hodnot `True` .
- Pro každé číslo  $v$  v zadaném seznamu přepíšeme na pozici určené tímto číslem hodnotu `True` na `False` , poté pozice prvního nepřepsaného `True` určuje hledané číslo.
- `[False, False, True, False, False]`  
`[0, 3, 1, 4]`

## Pozorování

- Nejmenší číslo bude vždy v rozsahu  $\langle 0, \text{length}(v) \rangle$ .

## Idea lepšího řešení

- Uvažme tabulku, ve které je  $(\text{length } v + 1)$  hodnot `True` .
- Pro každé číslo  $v$  zadaném seznamu přepíšeme na pozici určené tímto číslem hodnotu `True` na `False` , poté pozice prvního nepřepsaného `True` určuje hledané číslo.
- `[False, False, True, False, False]`  
`[0, 3, 1, 4]`

## Předpoklady

- Konstantní operace pro přístup k hodnotám omezeně dlouhého seznamu.

# Haskell efektivně, aneb od seznamů k polím

## Pole

- Seznam/tabulka adresovatelných míst pro uložení dat.
- Klíčovou vlastností je časově konstantní operace pro přístup k hodnotě na zadané adrese.
- Důležitá datová struktura v imperativním světě.

## Poznámka:

- Přístup k  $n$ -tému prvku seznamu je možné realizovat funkcí
  - $(!!) :: [a] \rightarrow \text{Int} \rightarrow a$
  - $(!!) (x:s) 0 = x$
  - $(!!) (\_ :s) n = (!! ) s (n-1)$
- Časová složitost operace  $(!!)$  ale není konstantní.

## Použití

- Pole jsou definována v modulu `Data.Array`.
- `import Data.Array`

## Typový konstruktor `Array`

- Binární typový konstruktor: `Array :: *->*->*`
- `Array I A` je typ všech polí, která jsou indexovaná (adresovaná) hodnotami typu `I` a obsahují prvky typu `A`.
- Typ použitý pro indexaci musí být instancí typové třídy `Ix`.

## Příklad hodnoty a typu

- `array (1,4) [(1,'a'),(2,'b'),(3,'a'),(4,'b')]`  
`:: (Num i, Ix i) => Array i Char`



## Typová třída `Ix`

- Instance typové třídy `Ix` umožňují efektivní implementaci pole.
- ```
class (Ord a) => Ix a where  
  range :: (a,a) -> [a]  
  index :: (a,a) -> a -> Int  
  inRange :: (a,a) -> a -> Bool
```

Meze pole

- Uspořádaná dvojice indexů tvoří meze pole.
- Všechny hodnoty uvnitř mezí pole jsou platné pro indexaci.
- `range` : Seznam platných hodnot daného rozsahu.
- `inRange` : Test zda je daný index v uvedených mezích.
- `index` : Pozice daného indexu v rozsahu uvedených mezí.

Instance třídy `Ix`

- Předdefinovanými instancemi třídy `Ix` jsou typy `Int`, `Integer`, `Char`, `Bool` a jejich kartézské součiny (se sebou samým).

Příklad 1

- `array ('D', 'F') [('D', 2014), ('E', 1977), ('F', 2001)]`
:: `Num e => Array Char e`

Příklad 2

- `range (5,9) ~\~* [5,6,7,8,9]`
- `range ('a', 'd') ~\~* "abcd"`
- `range ((1,1), (3,3)) ~\~*`
`[(1,1), (1,2), (1,3), (2,1), (2,2), (2,3), (3,1), (3,2), (3,3)]`

Přístup k prvkům pole

- Uvažme pole `arr :: Array I A` a index do pole `i :: I`, pak `arr!i` je prvek uložený v poli `arr` pod adresou `i`.
- `(!) :: Ix i => Array i e -> i -> e`
- Například:

```
array (5,6) [(5,"ANO!"),(6,"NE!")] ! 5           ~>* "ANO!"  
array ('D','E') [('D',2014),('E',1977)] ! 'D'     ~>* 2014
```

Aktualizace hodnot v poli

- Operace `//` zkopíruje původního pole a při kopírování aktualizuje uvedený seznam dvojic (index, hodnota).
- `(//) :: Ix i => Array i e -> [(i, e)] -> Array i e`
- Například:

```
array (1,2) [(1,1),(2,2)] // [(1,3),(2,3)]  
~>* array (1,2) [(1,3),(2,3)]
```

Meze pole

- `bounds :: Ix i => Array i e -> (i,i)`

Seznam indexů pole

- `indices :: Ix i => Array i e -> [i]`

Převody mezi poli a seznamy

- `elems :: Ix i => Array i e -> [e]`
- `listArray :: Ix i => (i,i) -> [e] -> Array i e`

Převody mezi poli a seznamy dvojic

- `assocs :: Ix i => Array i e -> [(i,e)]`
- `array :: Ix i => (i,i) -> [(i,e)] -> Array i e`

accumArray

- Knihovná funkce Haskellu.
- Vytváří pole ze seznamu dvojic (index, hodnota) a navíc akumuluje (funkcí foldl) prvky seznamu se stejným indexem.
- $\text{accumArray} :: \text{Ix } i \Rightarrow (\text{e} \rightarrow \text{a} \rightarrow \text{e}) \rightarrow \text{e}$
 $\rightarrow (i, i) \rightarrow [(i, \text{a})] \rightarrow \text{Array } i \text{ e}$
- Je-li akumulační funkce konstantní, pracuje v lineárním čase.

Příklady

- $\text{accumArray } (+) \ 0 \ (1,2) \ [(1,1), (1,1), (1,1)]$
 $\rightsquigarrow^* \text{array } (1,2) \ [(1,3), (2,0)]$
- $\text{accumArray } (\text{flip}(:)) \ [] \ (1,2) \ [(2, 'e'), (1, 'l'), (1, 'B'), (2, 'b')]$
 $\rightsquigarrow^* \text{array } (1,2) \ [(1, "Bl"), (2, "be")]$

Nejmenší nepoužité přirozené číslo II

(Richard Bird: Pearls of Functional Algorithm Design)

Postup

- `minfree s ∈ ⟨0, length(s)⟩`
`s = [1,2,6,2,0]`
- Nebudeme uvažovat čísla mimo očekávaný rozsah.
`(filter (<=n) s) where n = length s ~>* [1,2,2,0]`
- Vytvoříme asociační seznam (příprava na konverzi do pole).
`t s = (zip (filter (<=n) s) (repeat True))`
`where n = length s`
`t s ~>* [(1,True),(2,True),(2,True),(0,True)]`
- Vytvoříme pole a odstraníme duplicity tak, aby nepoužité indexy ukazovaly na `False`.
`checklist :: [Int] -> Array Int Bool`
`checklist s = accumArray (||) False (0,length s) (t s)`

Mezivýsledek

- `checklist s ~>* array (0,5) [(0,True),(1,True),(2,True),(3,False),(4,False),(5,False)]`

Postup pokračování

- V seznamu typu `Array Int Bool` najdeme nejmenší index odkazující na `False`.

```
search :: Array Int Bool -> Int
```

- Nejprve převedeme pole na seznam hodnot typu `Bool`

```
elems (checklist s)
```

```
↪* [True,True,True,False,False,False]
```

- Ze seznamu ponecháme pouze jeho prefix s hodnotami `True`

```
(takeWhile id . elems) (checklist s)
```

```
↪* [True,True,True]
```

- Index prvního `False` určíme jako délku tohoto prefixu.

```
search = length . takeWhile id . elems
```

```
search (checklist [1,2,6,2,0]) ↪* 3
```


Řešení

- `minfree = search . checklist`
`search :: Array Int Bool -> Int`
`search = length.takeWhile id . elems`
`checklist :: [Int] -> Array Int Bool`
`checklist s = accumArray (||) False (0,n)`
`(zip (filter (<=n) s) (repeat True))`
`where n = length s`

Složitost algoritmu

- `checklist` , `search` – lineární
- `minfree` – lineární

Lineární řazení některých seznamů

(Richard Bird: Pearls of Functional Algorithm Design)

Pozorování

- Jsou-li čísla v seznamu z omezeného rozsahu, je možné tento seznam setřídít v **lineárním čase**.

Algoritmus

- `max = 1000`

```
countlist :: [Int] -> Array Int Int
```

```
countlist s = accumArray (+) 0 (0,max) (zip s (repeat 1))
```

```
sortBoundedList s =
```

```
  concat [ replicate k x | (x,k) <- assocs (countlist s) ]
```

Příklad

- `sortBoundedList [3,3,4,1,0,3] \rightsquigarrow^* [0,1,3,3,3,4]`



IB015 Neimperativní programování

Neimperativní programování v Prologu (relace místo funkcí)

Jiří Barnat

Pozorování

- Podstata neimperativního programování je v tom, že popisuje (deklaruje) vztahy mezi objekty světa. Počítač se používá k tomu, aby na základě popsáných vztahů mechanicky vypočítal výsledek (dedukoval důsledek vztahů).

Haskell

- K popisu vztahů mezi objekty se používají **funkce**.
- Funkce má pro dané vstupy nejvýše jeden výstup.

Zobecnění na relace

- Výpočetní paradigma, kde se pro popis vztahů mezi objekty použijí relace, tj. k daným vstupům existuje více výstupů.

Logické výpočetní paradigma

- program = databáze faktů a pravidel + cíl.
- výpočet = dokazování cíle metodou SLD rezoluce.
- výsledek = pravda/nepravda a hodnoty volných proměnných, pro které je cíl dokazatelný.
- **Prolog** – jediný programovací jazyk.

SWI-Prolog

- Relativně úplná implementace Prologu.
- Freeware.
- <http://swi-prolog.org>



Úvodní intuitivní příklady

SWI-Prolog

- Interpret spuštěn příkazem `swipl`.

Textové interaktivní prostředí

- Standardní výzva: `?-`
- Veškeré povely uživatele musí být zakončeny tečkou.

Základní povely

- Ukončení prostředí: `halt.` (Ctrl+D)
- Návoděda: `help.`
- Načtení souboru `jmeno.pl`: `consult(jmeno).`
- Též alternativně:
`[jmeno].`
`consult('jmeno.pl').`

Struktura jednoduchých příkladů

- Databáze fakt a pravidel uvedena v externím souboru.
- Cíle zadávány skrze interpret.
- Přípona souboru: `.pl`

Notace fakt

- Fakta začínají malým písmenem a končí tečkou.
- Fakta jsou konstanty (nulární relace) a n-ární relace.
- Počet parametrů udáván u jména za lomítkem: `jmeno/N`.

Příklady

- `tohleJeFakt.`
- `tohleTaky(parametr1,parametr2,...,parametrN).`
- `fakt /* a /* zanoreny */ komentar */ .`

Databáze fakt

- je_teplo.
neprsi.
kamaradi(vincenc,kvido). /* Znají se od mateřské školy. */
kamaradi(vincenc,ferenc). /* Poznali se na pískovišti. */

Dotazy na databázi

- ?- je_teplo.
true.
- ?- prsi.
ERROR: Undefined prsi/0.
- ?- kamaradi(vincenc,kvido).
true.
- ?- kamaradi(ferenc,vincenc).
false.

Proměnné

- Jména začínají velkým písmenem nebo podtržítkem.
- Je možné je (mimojiné) využít v dotazech.
- Interpreter se pokusí najít vyhovující přiřazení.

Dotazy s využitím proměnných

- `?- kamaradi(vincenc,X).`
 `X = kvido ;`
 `X = ferenc.`
- `?- kamaradi(X,Y).`
 `X = vincenc,`
 `Y = kvido ;`
 `X = vincenc,`
 `Y = ferenc.`

Odpověď interpretru zakončená tečkou

- Indikuje, že nejsou další možnosti.

Odpověď interpretru nezakončená tečkou

- Výzva pro uživatele, zda chce hledání možných řešení ukončit (uživatel vloží tečku), nebo zda si přeje, aby bylo hledáno další řešení (uživatel vloží středník).

Porovnejte

- `?- kamaradi(vincenc,X).`
`X = kvido ; /* uživatel vložil středník */`
`X = ferenc.`
- `?- kamaradi(vincenc,X).`
`X = kvido . /* uživatel vložil tečku */`

Pravidla v databázi

- Zápis: $\text{clovek}(X) :- \text{zena}(X).$
- Význam: Pokud platí $\text{zena}(X)$, pak platí $\text{clovek}(X)$.

Disjunkce

- Zápis: $\text{clovek}(X) :- \text{zena}(X); \text{muz}(X).$
- Alternativní zápis:
 $\text{clovek}(X) :- \text{zena}(X).$
 $\text{clovek}(X) :- \text{muz}(X).$
- Význam: $(\text{zena}(X) \vee \text{muz}(X)) \implies \text{clovek}(X).$

Konjunkce

- Zápis: $\text{unikat}(X) :- \text{zena}(X), \text{muz}(X).$
- Význam: $(\text{zena}(X) \wedge \text{muz}(X)) \implies \text{unikat}(X).$

Databáze:

- `clovek(X) :- zena(X).`
`zena(bozena_nemcova).`

Příklady dotazů

- `?-zena(bozena_nemcova).`
`true.`
- `?-clovek(bozena_nemcova).`
`true.`
- `?-zena(jirik).`
`false.`
- `?- clovek(X).`
`X = bozena_nemcova.`

Rozsah platnosti proměnných

- Použití proměnné je lokalizováno na dané pravidlo.

Příklad

- ```
clovek(X) :- zena(X); muz(X).
unikat(X) :- zena(X), muz(X).
zena(bozena_nemcova).
zena(jara_cimrman).
muz(jara_cimrman).
```
- ```
?- clovek(X).  
X = bozena_nemcova ;  
X = jara_cimrman;  
X = jara_cimrman.
```
- ```
?- unikat(X).
X = jara_cimrman.
```



## Termy – Základní stavební kameny

## Pozorování

- Fakta, pravidla a dotazy jsou tvořeny z termů.

## Termy

- Atomy.
- Čísla.
- Proměnné.
- Strukturované termy.

## Proměnné

- Proměnné se zapisují s velkým počátečním písmenem.
- Hodnotou uloženou v proměnné může být libovolný term.
- **Prolog není striktně typovaný.**

## Atomy

- Řetězce začínající malým písmenem, obsahující písmena číslice a znak podtržítka.
- Libovolné řetězce uzavřené v jednoduchých uvozovkách.

## Příklady:

- Atomy: `pepa`, `'pepa'`, `'Pepa'`, `'2'`.
- Neatomy: `Pepa`, `2`, `ja a on`, `holmes&watson`.

## Test na bytí atomem

- `atom/1` – Pravda, pokud parametr je nestrukturovaným atomem.

## Čísła

- Celá i desetinná čísla, používá se desetinná tečka.

```
?- A is 2.5 * 1.3.
```

```
A = 3.25.
```

- Porovnání s aritmetickým vyhodnocením pomocí `==`.

```
?- 4 == 3+1.
```

```
true.
```

```
?- 4 == 3+1.
```

```
false.
```

```
?- 4 = 3+1.
```

```
false.
```

- Aritmetické vyhodnocení a přiřazení pomocí `is`.

```
?- A is 2*3.
```

```
A = 6.
```

```
?- A == 2*3.
```

```
false.
```

```
?- A = 2*3.
```

```
A = 2*3.
```

## Testy na bytí číslem

- `number/1` – Pravda, pokud je parametr číslo.
- `float/1` – Pravda, pokud je parametr desetinné číslo.
- `=\=/2` – Aritmetická neekvivalence.

## Strukturované termy

- Funktor (název relace) následovaný sekvencí argumentů.
- Pro funktor platí stejná syntaktická omezení jako pro atomy.
- Argumenty se uvádějí v závorkách, oddělené čárkou.
- Mezi funktorem a seznamem argumentů nesmí být mezera.
- Argumentem může být libovolný term.
- Rekurze je možná.

## Arita

- Počet argumentů strukturovaného termu.
- Identifikace strukturovaného termu: `funktor/N`.
- Stejný funktor s jinou aritou označuje jiný term.
- Je možné současně definovat termy `term/2` i `term/3`.

## Unifikace v Prologu

## Definice

- Dva termy jsou unifikovatelné, pokud jsou identické, anebo je možné zvolit hodnoty proměnných použitých v unifikovaných termech tak, aby po dosazení těchto hodnot byly termy identické.

## Operátor `=/2`

- Realizuje unifikaci v Prologu.
- Lze zapisovat infixově.
- Binární operátor ne-unifikace: `\=`, tj. ve standardní notaci `\=/2`.

## Výsledek unifikace

- Ano/Ne
- Unifikační přiřazení do proměnných (substituce).

## Bez unifikačního přiřazení

- $?- \text{=(slovo,slovo)}.$   
 $\text{true.}$

## S unifikačním přiřazením

- $?- \text{=(slovo,X)}.$   
 $X = \text{slovo.}$
- $?- \text{a(A,[ble,ble]) = a(b(c(d)),B)}.$   
 $A = \text{b(c(d))},$   
 $B = [\text{ble, ble}].$



- 1) Pokud jsou `term1` a `term2` konstanty (atomy, čísla), pak se unifikují, jestliže jsou tyto termy shodné.
- 2) Pokud je `term1` proměnná a `term2` je libovolný term, pak se unifikují a proměnná `term1` je instanciována hodnotou `term2`. Podobně, pokud je `term2` proměnná a `term1` je libovolný term, pak se unifikují a proměnná `term2` je instanciována hodnotou `term1`.
- 3) Pokud jsou `term1` a `term2` strukturované termy tak se unifikují, pouze pokud mají stejný funktor a aritu, všechny korespondující páry argumentů se unifikují, a všechny instanciaci proměnných z vnořených unifikací jsou kompatibilní.
- 4) Nic jiného.

# Příklady unifikace

- `?- snida(karel,livance) = snida(Kdo,Co).`  
`Kdo = karel,`  
`Co = livance.`
- `?- snida(karel,Jidlo) = snida(Osoba,marmelada).`  
`Jidlo = marmelada,`  
`Osoba = karel.`
- `?- cdcko(29,beatles,yellow_submarine) = cdcko(A,B,help).`  
`false.`
- `?- fce(X,val) = fce(val,X).`  
`X = val.`
- `?- partneri(eva,X) = partneri(X,vasek).`  
`false.`
- `?- fce(X,Y) = fce(Z,Z).`  
`X = Y, Y = Z.`

## Příklad

- Uvažme následující dotaz na Prolog:  
 $?- X = \text{otec}(X).$
- Jsou unifikovatelné termy, kde jeden term je proměnná a přitom je vlastním podvýrazem druhého termu?

## Nekorektnost algoritmu

- Podle definice ne, neboť neexistuje hodnota této proměnné taková, aby po dosazení nastala identita termů.
- Dle algoritmu na předchozím slajdu, však k unifikaci dojde:  
 $?- X = \text{otec}(X).$   
 $X = \text{otec}(X).$

## Poznámka

- Některé implementace Prologu mohou při této unifikaci cyklit.

## Kontrola sebevýskytu

- Algoritmus je možné modifikovat tak, aby dával korektní odpověď. Pokud se samostatná proměnná vyskytuje jako podvýraz v druhém termu, termy se neunifikují.
- V praxi se často jedná o nadbytečný test, unifikace je velice častá operace, z důvodu výkonnosti se tento test vynechává.

## `unify_with_occurs_check/2`

- Specifický operátor unifikace s testem na sebevýskyt.
- `?- unify_with_occurs_check(X,otec(X)).`  
`false.`

## Pozorování

- Unifikace je jeden z fundamentů logického programování.
- Pomocí unifikace můžeme odvozovat i sémantickou informaci.

## Příklad

- ```
vertical(line(point(X,Y),point(X,Z))).  
horizontal(line(point(X,Y),point(Z,Y))).  
  
?- horizontal(line(point(2,3),point(12,3))).  
true.  
  
?- vertical(line(point(1,1),X)).  
X = point(1, _G2240).
```

Jak Prolog počítá

Teorie

- Výpočet = dokazování.
- Kódování problému pomocí Hornových klauzulí.
- Dokazování Selektivní Lineární Definitní rezolucí.
- Při výpočtu Prologu se konstruuje a prochází SLD strom.

V rámci IB015

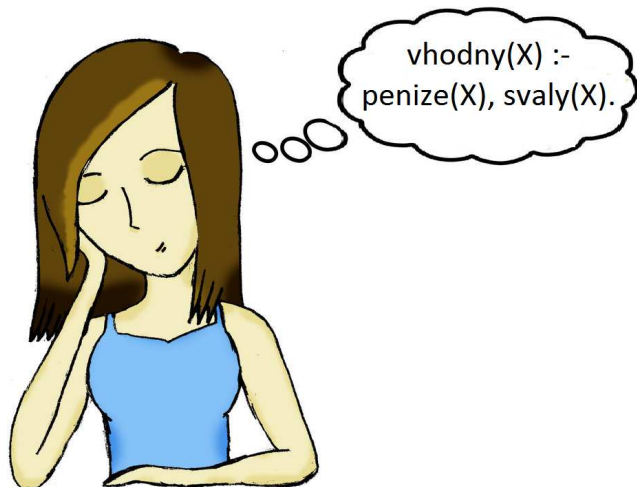
- Princip výpočtu s využitím příkladů a neformální demonstrace postupu bez intelektuální zátěže odpovídajícího teoretického fundamentu.

Pozorování

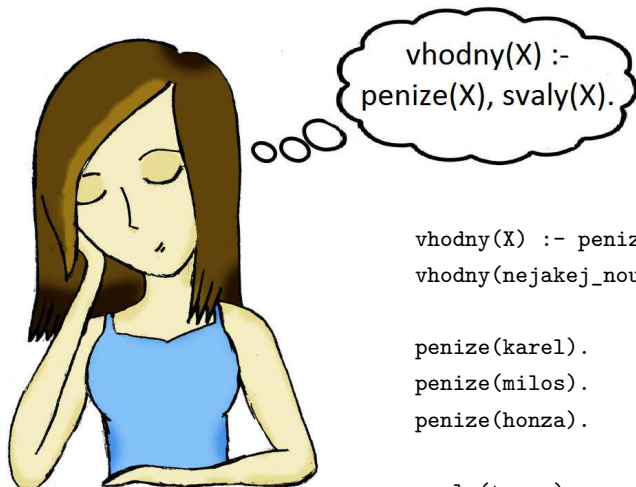
- Při výpočtu Prolog vždy využívá fakta v tom pořadí, v jakém jsou uvedeny v programu.

Příklad

- `players(flink,diablo_III).`
`players(flink,world_of_tanks).`
`players(flink,master_of_orion).`
- `?- players(flink,X).`
`X = diablo_III; /* uživatel vložil ; */`
`X = world_of_tanks ; /* uživatel vložil ; */`
`X = master_of_orion.`
- `?- players(flink,X).`
`X = diablo_III . /* uživatel vložil . */`



Příběh slečny Prology, aneb jak s pravidly



```
vhodny(X) :- penize(X), svaly(X).  
vhodny(nejakej_nouma).
```

```
penize(karel).  
penize(milos).  
penize(honza).
```

```
svaly(tomas).  
svaly(honza).  
svaly(karel).
```

```
v(X) :- p(X), s(X).
```

```
v(nouma).
```

?- v(X)

```
p(karel).
```

```
p(milos).
```

```
p(honza).
```

```
s(tomas).
```

```
s(honza).
```

```
s(karel).
```

```
?-v(X).
```

Příběh slečny Prology

```
v(X) :- p(X), s(X).
```

```
v(nouma).
```

```
p(karel).
```

```
p(milos).
```

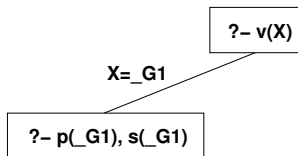
```
p(honza).
```

```
s(tomas).
```

```
s(honza).
```

```
s(karel).
```

```
?-v(X).
```



Příběh slečny Prology

```
v(X) :- p(X), s(X).
```

```
v(nouma).
```

```
p(karel).
```

```
p(milos).
```

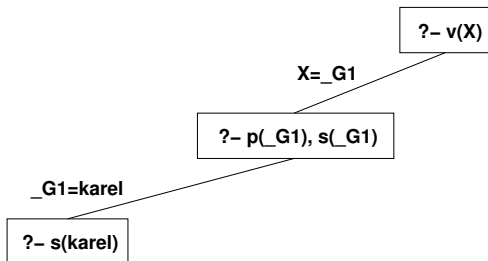
```
p(honza).
```

```
s(tomas).
```

```
s(honza).
```

```
s(karel).
```

```
?-v(X).
```



Příběh slečny Prology

```
v(X) :- p(X), s(X).
```

```
v(nouma).
```

```
p(karel).
```

```
p(milos).
```

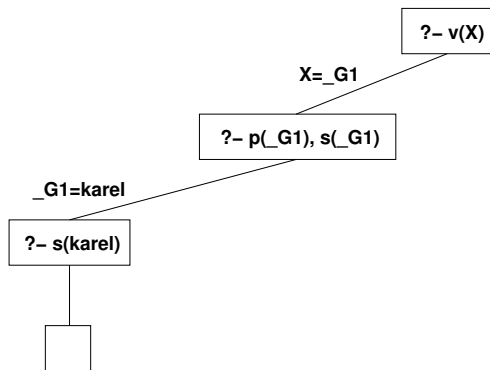
```
p(honza).
```

```
s(tomas).
```

```
s(honza).
```

```
s(karel).
```

```
?-v(X).
```



Příběh slečny Prology

```
v(X) :- p(X), s(X).
```

```
v(nouma).
```

```
p(karel).
```

```
p(milos).
```

```
p(honza).
```

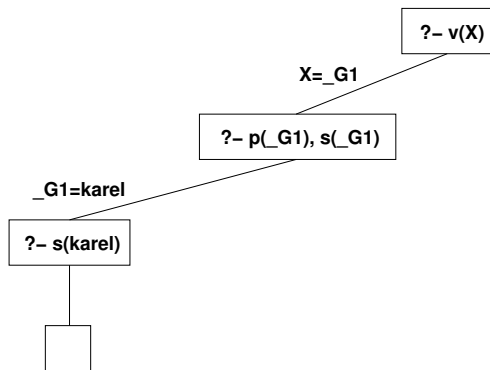
```
s(tomas).
```

```
s(honza).
```

```
s(karel).
```

```
?-v(X).
```

```
karel
```



Příběh slečny Prology

```
v(X) :- p(X), s(X).
```

```
v(nouma).
```

```
p(karel).
```

```
p(milos).
```

```
p(honza).
```

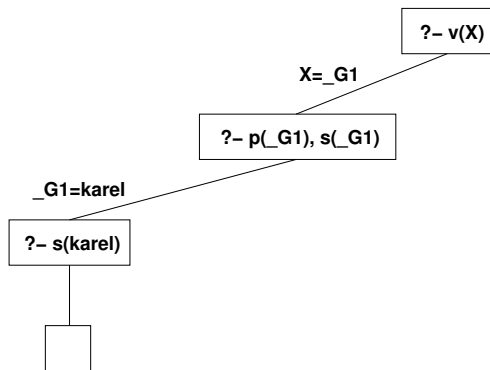
```
s(tomas).
```

```
s(honza).
```

```
s(karel).
```

```
?-v(X).
```

```
karel ; /* uživatel vložil ; */
```



Příběh slečny Prology

```
v(X) :- p(X), s(X).
```

```
v(nouma).
```

```
p(karel).
```

```
p(milos).
```

```
p(honza).
```

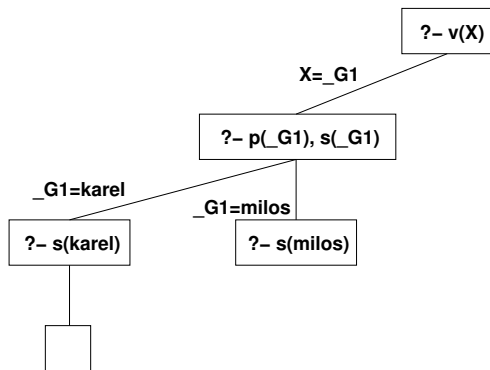
```
s(tomas).
```

```
s(honza).
```

```
s(karel).
```

```
?-v(X).
```

```
karel ; /* uživatel vložil ; */
```



Příběh slečny Prology

```
v(X) :- p(X), s(X).
```

```
v(nouma).
```

```
p(karel).
```

```
p(milos).
```

```
p(honza).
```

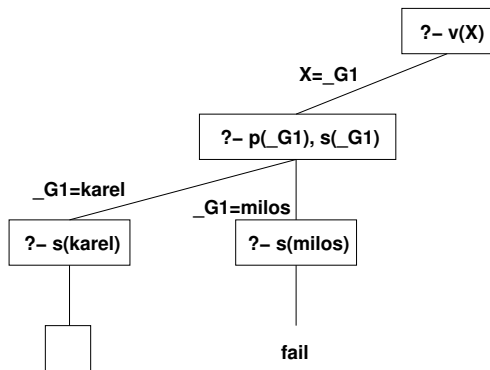
```
s(tomas).
```

```
s(honza).
```

```
s(karel).
```

```
?-v(X).
```

```
karel ; /* uživatel vložil ; */
```



Příběh slečny Prology

```
v(X) :- p(X), s(X).
```

```
v(nouma).
```

```
p(karel).
```

```
p(milos).
```

```
p(honza).
```

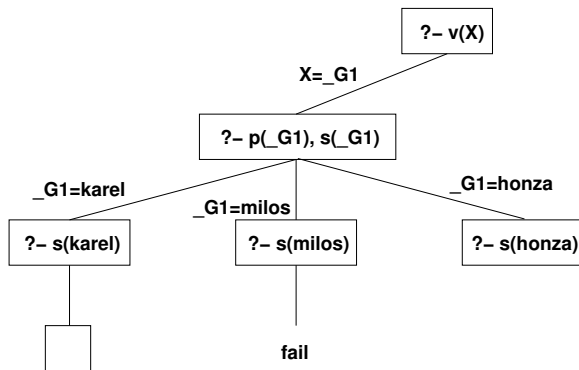
```
s(tomas).
```

```
s(honza).
```

```
s(karel).
```

```
?-v(X).
```

```
karel ; /* uživatel vložil ; */
```



Příběh slečny Prology

```
v(X) :- p(X), s(X).
```

```
v(nouma).
```

```
p(karel).
```

```
p(milos).
```

```
p(honza).
```

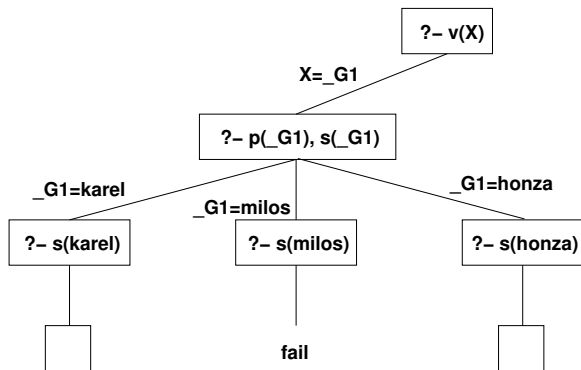
```
s(tomas).
```

```
s(honza).
```

```
s(karel).
```

```
?-v(X).
```

```
karel ; /* uživatel vložil ; */
```



Příběh slečny Prology

```
v(X) :- p(X), s(X).
```

```
v(nouma).
```

```
p(karel).
```

```
p(milos).
```

```
p(honza).
```

```
s(tomas).
```

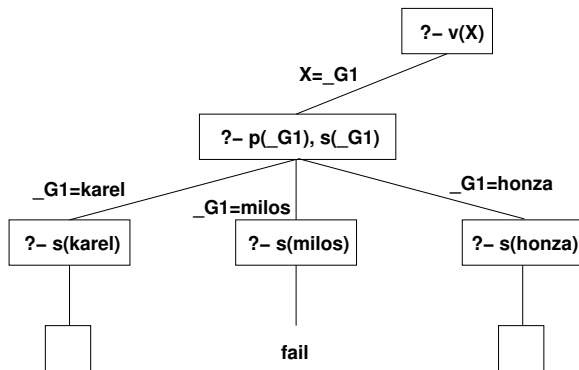
```
s(honza).
```

```
s(karel).
```

```
?-v(X).
```

```
karel ; /* uživatel vložil ; */
```

```
honza
```



Příběh slečny Prology

```
v(X) :- p(X), s(X).
```

```
v(nouma).
```

```
p(karel).
```

```
p(milos).
```

```
p(honza).
```

```
s(tomas).
```

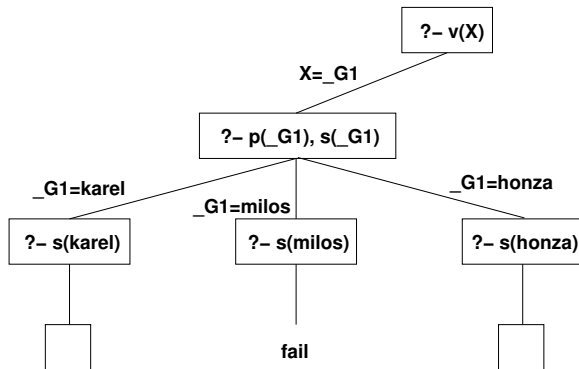
```
s(honza).
```

```
s(karel).
```

```
?-v(X).
```

```
karel ; /* uživatel vložil ; */
```

```
honza ; /* uživatel vložil ; */
```



Příběh slečny Prology

```
v(X) :- p(X), s(X).
```

```
v(nouma).
```

```
p(karel).
```

```
p(milos).
```

```
p(honza).
```

```
s(tomas).
```

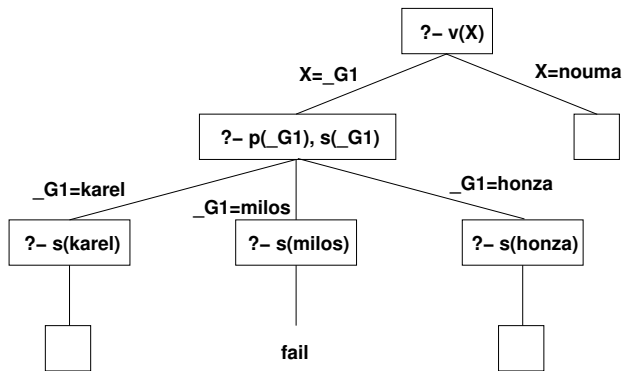
```
s(honza).
```

```
s(karel).
```

```
?-v(X).
```

```
karel ; /* uživatel vložil ; */
```

```
honza ; /* uživatel vložil ; */
```



Příběh slečny Prology

```
v(X) :- p(X), s(X).
```

```
v(nouma).
```

```
p(karel).
```

```
p(milos).
```

```
p(honza).
```

```
s(tomas).
```

```
s(honza).
```

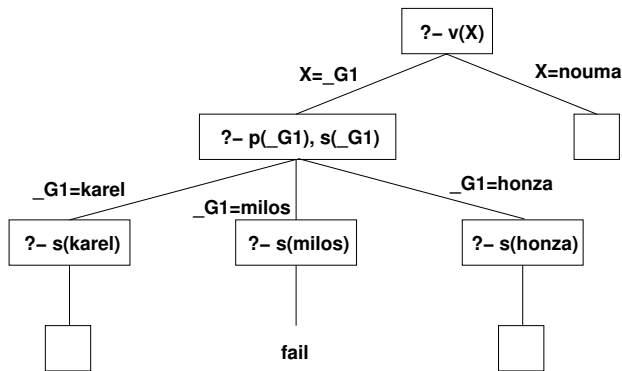
```
s(karel).
```

```
?-v(X).
```

```
karel ; /* uživatel vložil ; */
```

```
honza ; /* uživatel vložil ; */
```

```
nouma.
```



Konstrukce výpočetního stromu

- Pro první podcíl v daném vrcholu se prohledává databáze faktů a pravidel vždy od začátku. Pro každou nalezenou vyhovující položku je vytvořen nový vrchol.
- Vrchol je vytvořen tak, že první podcíl se unifikuje s hlavou nalezené položky, a v nově vzniklém vrcholu je nahrazen tělem nalezené položky (fakta mají prázdné tělo, cíl je "vynechán").
- Hrana vedoucí do nového vrcholu je anotována unifikačním přiřazením. Proměnné vyskytující se v těle pravidla, které nejsou dotčeny unifikací, jsou označeny čerstvou proměnnou.
- Prázdné vrcholy (listy) značí úspěch, hodnoty hledaných proměnných vyplývají z unifikačních přiřazení na cestě od listu ke kořeni stromu.
- Vrcholy, pro které se nepodařilo nalézt položku v databázi vyhovující prvnímu podcílu jsou označeny podvrcholem **fail**.

?- f(G1)

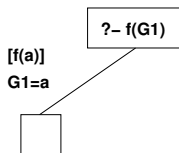
r(a,b).

r(a,c).

f(a).

f(X):-f(Y),r(Y,X).

Výpočet s rekurzí



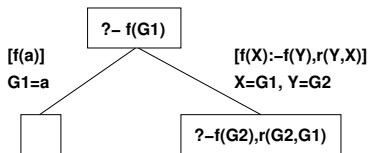
$r(a, b).$

$r(a, c).$

$f(a).$

$f(X) :- f(Y), r(Y, X).$

Výpočet s rekurzí



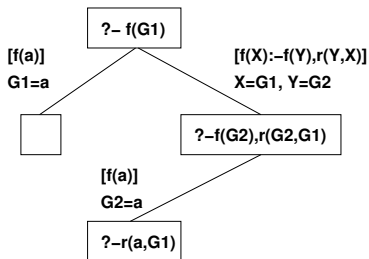
$r(a, b) .$

$r(a, c) .$

$f(a) .$

$f(X) :- f(Y), r(Y, X) .$

Výpočet s rekurzí



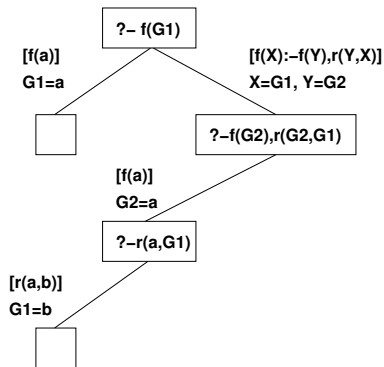
$r(a, b) .$

$r(a, c) .$

$f(a) .$

$f(X) :- f(Y), r(Y, X) .$

Výpočet s rekurzí



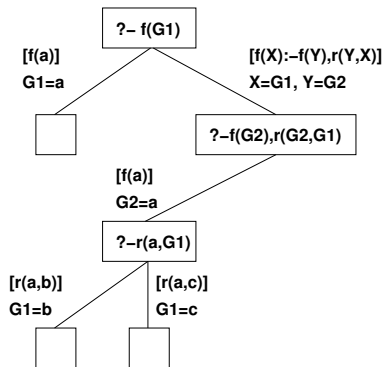
$r(a, b) .$

$r(a, c) .$

$f(a) .$

$f(X) :- f(Y), r(Y, X) .$

Výpočet s rekurzí



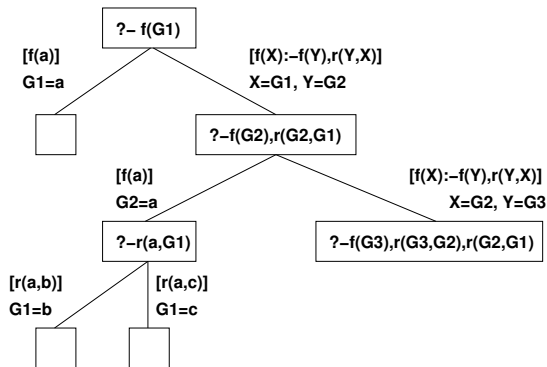
$r(a, b) .$

$r(a, c) .$

$f(a) .$

$f(X) :- f(Y), r(Y, X) .$

Výpočet s rekurzí



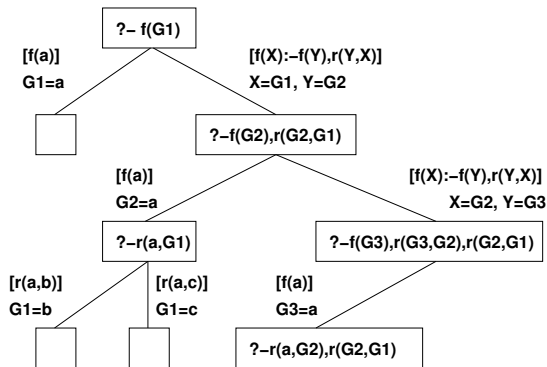
$r(a, b) .$

$r(a, c) .$

$f(a) .$

$f(X) :- f(Y), r(Y, X) .$

Výpočet s rekurzí



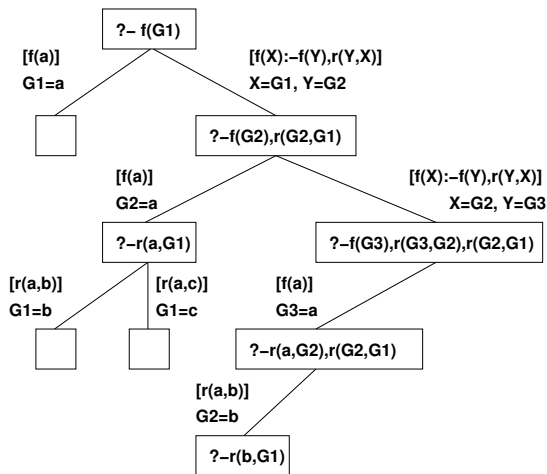
$r(a, b) .$

$r(a, c) .$

$f(a) .$

$f(X) :- f(Y), r(Y, X) .$

Výpočet s rekurzí



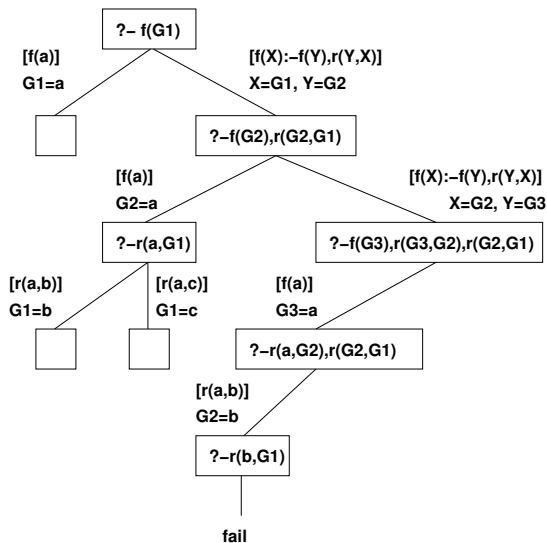
$r(a, b) .$

$r(a, c) .$

$f(a) .$

$f(X) :- f(Y), r(Y, X) .$

Výpočet s rekurzí



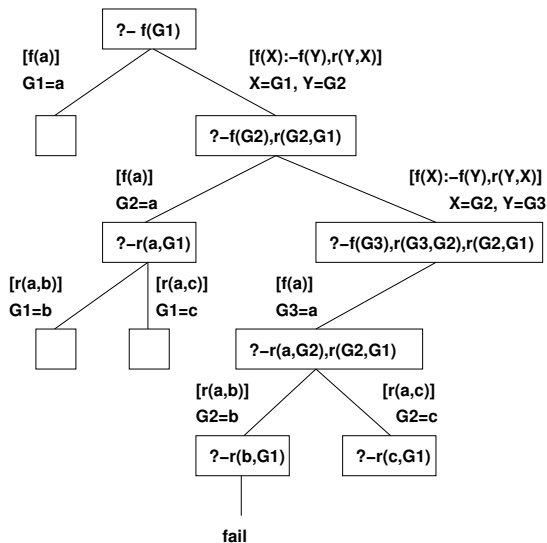
$r(a, b)$.

$r(a, c)$.

$f(a)$.

$f(X) :- f(Y), r(Y, X)$.

Výpočet s rekurzí



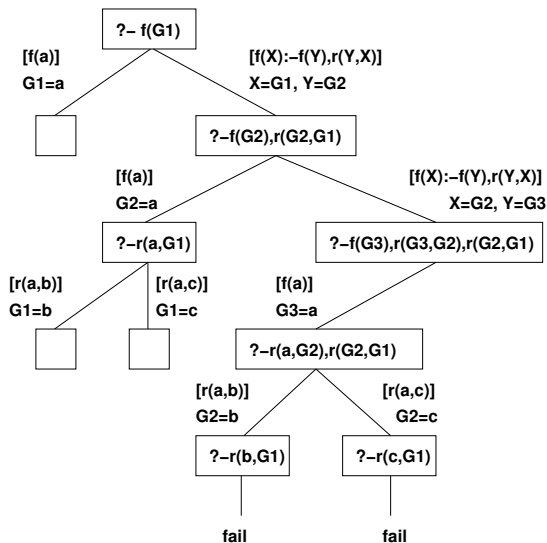
$r(a, b)$.

$r(a, c)$.

$f(a)$.

$f(X) :- f(Y), r(Y, X)$.

Výpočet s rekurzí



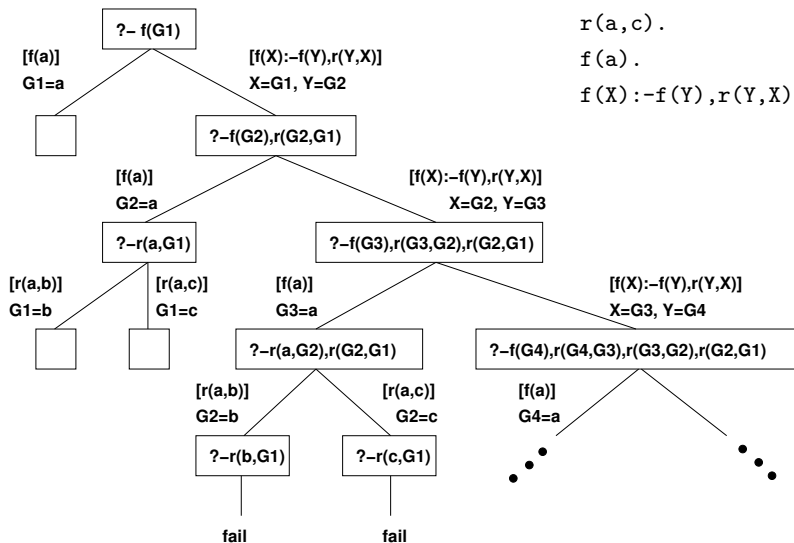
$r(a, b) .$

$r(a, c) .$

$f(a) .$

$f(X) :- f(Y), r(Y, X) .$

Výpočet s rekurzí



$r(a, b) .$
 $r(a, c) .$
 $f(a) .$
 $f(X) :- f(Y), r(Y, X) .$

Pozorování

- Strom je procházen algoritmem prohledávání do hloubky.
- Výpočet nad nekonečnou větví stromu prakticky končí chybovou hláškou o nedostatečné velikosti paměti zásobníku.
- Použití levorekurzivních pravidel (první podcíl v těla pravidla je rekurzivní použití hlavy pravidla) často vede k nekonečné větvi, a to i v případě, kdy počet vyhovujících přiřazení na původní dotaz je konečný.
- Pořadí faktů a pravidel v databázi neovlivní počet úspěšných listů ve výpočetním stromu, ale ovlivní jejich umístění (tj. pořadí, ve kterém budou nalezeny a prezentovány uživateli.)

Doporučení

- Používají se pravorekurzivní definice pravidel.
- Fakta se uvádějí před pravidly.

Příklad

- S využitím znalostí prezentovaných v této přednášce naprogramujte nad databází měst:

```
mesto(prague).
```

```
mesto(viena).
```

```
mesto(warsaw).
```

```
mesto(roma).
```

```
mesto(paris).
```

```
mesto(madrid).
```

predikát `triMesta/3`, který je pravdivý pokud jako argumenty dostane tři různá města uvedené v databázi.

Nekonečný výpočet

- Narhňte program v jazyce Prolog takový, aby ze zadání bylo zřejmé, že odpověď na určený dotaz je pravdivá, ovšem výpočet Prologu k tomuto výsledků nikdy nedospěje.

IB015 Neimperativní programování

Seznamy, Aritmetika a Efektivita výpočtu v Prologu

Jiří Barnat

Výpočty nad seznamy v Prologu

Seznam v Prologu

- Sekvence prvků (mohou být typově různorodé).
- Pro dekompozici na hlavu a tělo se používá znak |.
- Hlavu lze zobecnit na neprázdnou konečnou sekvenci prvků.

Příklady

- $?- [H|T] = [\text{marek}, \text{matous}, \text{lukas}, \text{jan}] .$

H = marek,

T = [matous, lukas, jan].

- $?- [X,Y|Z] = [1,2,3,4] .$

X = 1,

Y = 2,

Z = [3, 4].

- $?- [X|Y|Z] = [1,2,3,4] .$

ERROR

Anonymní proměnná

- Označená znakem podtržítka.
- Nelze se na ni odkázat v jiném místě programu.
- Při použití v unifikačním algoritmu neklade žádné omezení na kompatibilitu přiřazení hodnot jednotlivým proměnným.

Příklady unifikace s anonymní proměnnou

- $?- f(a,X)=f(X,b).$ $?- f(a,X)=f(_,b).$ $?- f(a,_) = f(_,b).$
false. $X = b.$ true.
- Unifikací získejte 2. a 4. prvek seznamu Seznam:
 $[_ , X , _ , Y | _] = \text{Seznam}.$

Pozorování

- Při vytváření programu v prologu, který má něco spočítat nebo vytvořit, postupujeme dle obecného pravidla transformace funkce $f(A) = B$ na predikát $r(A,B)$.

Zadání

- Definujte predikát $a2b/2$, který transformuje seznam termů a na stejně dlouhý seznam termů b .

Řešení

- $a2b([], []).$
 $a2b([a|Ta], [b|Tb]) :- a2b(Ta, Tb).$

Použití

- $?- a2b([a, a, a, a], X).$ $?- a2b(X, [b, b, b, b]).$
 $X = [b, b, b, b].$ $X = [a, a, a, a].$
- $?- a2b(X, Y).$
 $X = Y, Y = [] ;$
 $X = [a], Y = [b] ;$
 $X = [a, a], Y = [b, b] ;$
 $X = [a, a, a], Y = [b, b, b].$

length/2

- `length(L,I)` je pravda pokud délka seznamu `L` má hodnotu `I`.
- Prázdný seznam má délku 0.
- `?- length([a,ab,abc],X).`
`X = 3.`
- `?- length([[1,2,3]],X).`
`X = 1.`
- `?- length(X,2).`
`X = [_G907, _G910].`

Test na bytí seznamem

- `is_list/1` – Pravda, pokud parametr je seznam.
- `?- is_list(['aha',[2,'b']], [],2.3).`
`true.`

member/2

- Zjištění přítomnosti prvku v seznamu.
- `member(X,L)` je pravda, pokud objekt `X` je prvkem seznamu `L`.
- Implementace:

```
member(X, [X|_]).
```

```
member(X, [_|T]) :- member(X,T).
```

Postup výpočtu:

- `?- member(lukas, [marek, matous, lukas, jan]).`

↪

```
?- member(lukas, [matous, lukas, jan]).
```

↪

```
?- member(lukas, [lukas, jan]).
```

```
true.
```

Pozorování

- Volnou proměnnou lze použít jak v prvním, tak i v druhém argumentu. Pomocí predikátu je možné enumerovat prvky seznamu, ale také vynutit, že daný prvek je prvkem seznamu.

Příklady

- `?- member(X, [marek, matous, lukas, jan]).`
`X = marek ;`
`X = matous ;`
`X = lukas ;`
`X = jan ;`
`false.`
- `?- member(jan, [marek, matous, lukas, X]).`
`X = jan ;`
`false.`

append/3

- Dotaz `append(L1,L2,L3)` se vyhodnotí na pravda, pokud seznam `L3` je zřetěžením seznamů `L1` a `L2`.

Definice append

- `append([],L,L)` .
`append([H1|T1],L2,[H1|T3]) :- append(T1,L2,T3)` .

Použití

- Test na to, zda $L1 \cdot L2 = L3$.
- Test na rovnost seznamů.
- Výpočet zřetěžení dvou seznamů.
- Odvození prefixu, nebo sufixu v daném seznamu.
- Generování seznamů, jejichž zřetěžení má daný výsledek.

Definice append v Prologu

- `append([],L,L).`
`append([H1|T1],L2,[H1|T3]) :- append(T1,L2,T3).`

Definice append v Haskellu

- `append [] l = l`
`append (h1:t1) l2 = h1:t3 where t3 = (append t1 l2)`

Pozorování

- 'Ahoj' není totéž co "Ahoj" .
- Řetězce znaků uvedených v uvozovkách jsou chápány jako seznamy čísel, které odpovídají ASCII kódům jednotlivých znaků řetězce.
- "Ahoj" == [65,104,111,106].

Automatická konverze na seznam čísel

- ?- append("Ale ", "ne!", X).
X = [65, 108, 101, 32, 110, 101, 33].

Konverze na řetězce

- Vybrané předdefinované predikáty vynutí prezentaci ve formě "řetězce".

Syntaktická rovnost

- `?- 'pepa' == "Pepa".`
`false.`

`?- 'mouka' == 'mouka'.`
`true.`

`?- 4 == 3+1.`
`false.`

`?- 3+1 == 3+1.`
`true.`

Pozor na syntaktické ekvivalenty

- `?- 'pepa' == pepa.`
`true.`

`?- [97] == "a".`
`true.`

Aritmetika

Celá čísla - integer

- Nativní typ, využívá knihovnu GMP.
- Velikost čísel omezena pouze velikostí dostupné paměti.

Desetinná čísla - float

- Nativní typ, odpovídá typu `double` z programovacího jazyka C.

Racionální čísla - rational

- Reprezentované s využitím složeného termu `rdiv(N,M)`.
- Výsledek vrácený operátorem `is/2` je kanonizován, tj. M je kladné a M a N nemají společného dělitele.

Konverze a unifikace

- `rdiv(N,1)` se konvertuje na celé číslo N.
- Automatické konverze ve směru od celých čísel k desetinným.
- Riziko vyvolání výjimky přetečení.
- Čísla různých typů se **neunifikují**.

Relační operátory

</2	menší než
>/2	větší než
=</2	menší nebo rovno
>=/2	větší nebo rovno
==/2	rovno
!=/2	nerovno

Bitové operace

<</2	bitový posun vlevo
>>/2	bitový posun vpravo
\ /2	bitové OR
&/2	bitové AND
\ 1	bitová negace
xor/2	bitový XOR

Vybrané aritmetické funkce

-/1	unární mínus	//2	celočíselné dělení
+/1	znaménko plus	rem/2	zbytek po dělení //
+/2	součet	div/2	dělení a zaokrouhlení dolů
-/2	rozdíl	mod/2	zbytek po dělení div
*/2	součin	max/2	maximum
//2	dělení	min/2	minimum
**/2	mocnina	is/2	vyhodnocení a unifikace

Pozorování

- Pro strukturovaný term, který dává do relace dva jiné termy, je možné nechat Prolog dohledat termy, pro které relace platí.
- `rel(a,b).`
`?- rel(X,b).`
`X = a.`

Neplatí pro argumenty aritmetických operací

- Prolog při unifikaci a rezoluci nepočítá inverzní funkce, v okamžiku požadavku na takovouto operaci ohlásí interpret chybu (nedostatečná instanciace).
- Porovnejte:
`?- X is 3*3.` `?- 9 is 3*X.`
`X = 9.` **ERROR**

Vyzkoušejte

- `?- 9 is X + 1.` `?- X > 3.` `?- X = 2, X > 3.`
ERROR **ERROR** `false.`

Vysvětlete rozdílné chování

- Korektní definice predikátu pro výpočet délky seznamu.
`length([],0).`
`length([_|T],N) :- length(T,X), N is X+1.`
- Nevhodná definice predikátu pro výpočet délky seznamu.
`length1([],0).`
`length1([_|T],N) :- N is X+1, length1(T,X).`
- Rozdílné chování při výpočtu.
`?- length([a,b],X).` `?- length1([a,b],X).`
`X = 2.` **ERROR**

Pozorování

- Předdefinované predikáty mohou vyžadovat, aby některé parametry byly povinně instanciované, tzn. na jejich místě nelze použít proměnnou.

Používaná notace v dokumentaci

- +Arg: musí být instanciovaný parametr.
- -Arg: očekává se proměnná.
- ?Arg: instanciovaný parametr nebo proměnná.
- @Arg: parametr nebude vázán unifikací.
- :Arg: parametrem je název predikátu.

Módy použití

- Je-li binární predikát použit s dvěma instanciovanými parametry, říkáme, že predikát je použit v (+,+) módu.

`between(+Low, +High, ?Value)`

- Low and High are integers, $\text{High} \geq \text{Low}$. If Value is an integer, $\text{Low} \leq \text{Value} \leq \text{High}$. When Value is a variable it is successively bound to all integers between Low and High. If High is inf or infinite `between/3` is true iff $\text{Value} \geq \text{Low}$, a feature that is particularly interesting for generating integers from a certain value.

`plus(?Int1, ?Int2, ?Int3)`

- True if $\text{Int3} = \text{Int1} + \text{Int2}$. **At least two of the three arguments must be instantiated to integers.**

`sort(+List, -Sorted)`

- True if Sorted can be unified with a list holding the elements of List, sorted to the standard order of terms. Duplicates are removed. The implementation is in C, using natural merge sort.

The `sort/2` predicate can sort a cyclic list, returning a non-cyclic version with the same elements.

Efektivita – Tail rekurze

Pozorování

- Uvažme následující definici predikátu `length`.
`length([],0).`
`length([_|T],N) :- length(T,X), N is X+1.`
- Nevýhodou této definice je, že při volání dochází k výpočtu před rekurzivním voláním (při rekurzivním sestupu) i po rekurzivním volání (při vynořování z rekurze).

Tail rekurze

- Definice, jež nevynechává výpočet po rekurzivním volání, tj. rekurzivní cíl je jeden a je uveden jako poslední podcíl.
- Výsledek je znám při dosažení dna rekurzivního sestupu.
- Menší režie výpočtu, větší efektivita.
- Platí i ve světě imperativních programovacích jazyků.

Pozorování

- Tail-rekurzivní definice lze dosáhnout použitím akumulátoru.

Predikát `length` definován tail-rekurzivně

- Realizace pomocným predikátem s akumulátorem.

`length(Seznam, Delka) :- accLen(Seznam, 0, Delka).`

- Definice pomocného predikátu.

`accLen([], A, A).`

`accLen([_|T], A, L) :- B is A+1, accLen(T, B, L).`

- Mód použití `accLen` je `(?, +, ?)`.

Efektivita – Řez

Pozorování

- Základem výpočtu logického programu je **backtracking**.
- Některé větve výpočtu nevedou k požadovanému cíli.
- Jistá kontrola nad způsobem prohledávání SLD stromu, by byla vhodná.

Dosavadní možnosti ovlivnění výpočtu

- Změna pořadí faktů v databázi.
- Změna pořadí podcílů v definici pravidla.

Operátor řezu – !/0

- Vždy jako podcíl úspěje.
- Ovlivňuje způsob výpočtu (má vedlejší efekt).
- Eliminuje další volby, které by Prolog udělal při procházení výpočetního stromu, a to od okamžiku unifikace podcíle s levou stranou pravidla, ve kterém se predikát ! vyskytuje, až do místa výskytu !.

Důsledky vedlejšího efektu

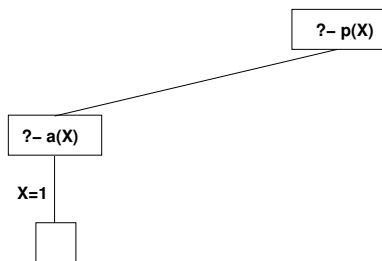
- Prořezává výpočetní strom.
- Rychlejší výpočet.
- Riziko odřezání větví výpočtu, které vedou k dalším (stejným, či jiným) řešením.

Příklad fungování řezu – bez řezu

?- p(X)

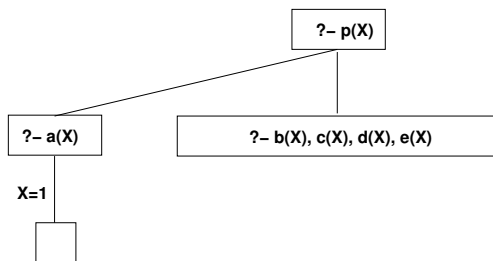
```
p(X) :- a(X).  
p(X) :- b(X), c(X),  
         d(X), e(X).  
p(X) :- f(X).  
  
a(1).  
b(1). c(1).  
d(1). d(2). e(2).  
f(3).  
b(2). c(2).
```

Příklad fungování řezu – bez řezu



```
p(X) :- a(X).  
p(X) :- b(X), c(X),  
          d(X), e(X).  
p(X) :- f(X).  
  
a(1).  
b(1). c(1).  
d(1). d(2). e(2).  
f(3).  
b(2). c(2).
```

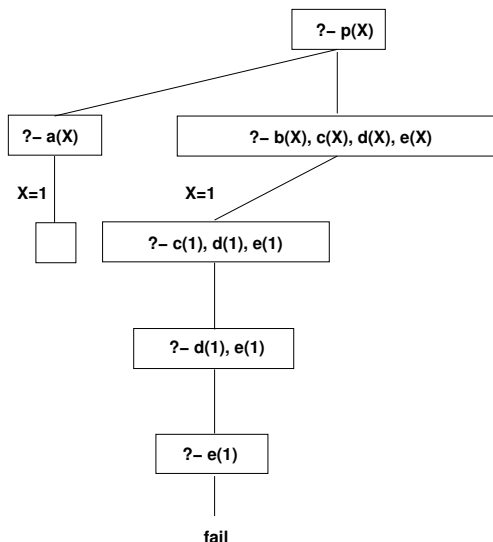
Příklad fungování řezu – bez řezu



```
p(X) :- a(X).  
p(X) :- b(X), c(X),  
        d(X), e(X).  
p(X) :- f(X).
```

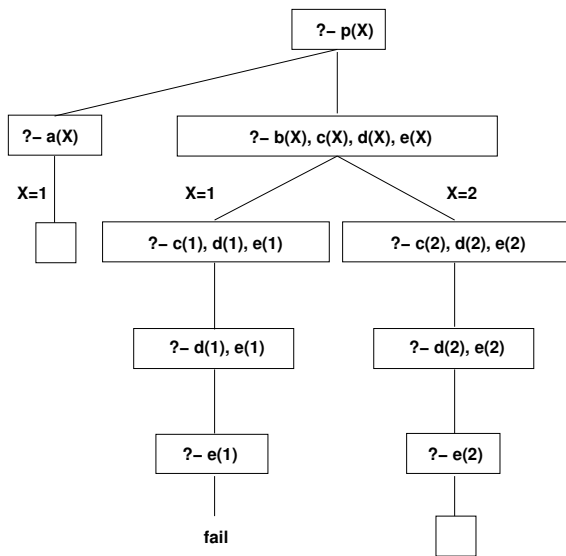
```
a(1).  
b(1). c(1).  
d(1). d(2). e(2).  
f(3).  
b(2). c(2).
```

Příklad fungování řezu – bez řezu



```
p(X) :- a(X).  
p(X) :- b(X), c(X),  
        d(X), e(X).  
p(X) :- f(X).  
  
a(1).  
b(1). c(1).  
d(1). d(2). e(2).  
f(3).  
b(2). c(2).
```

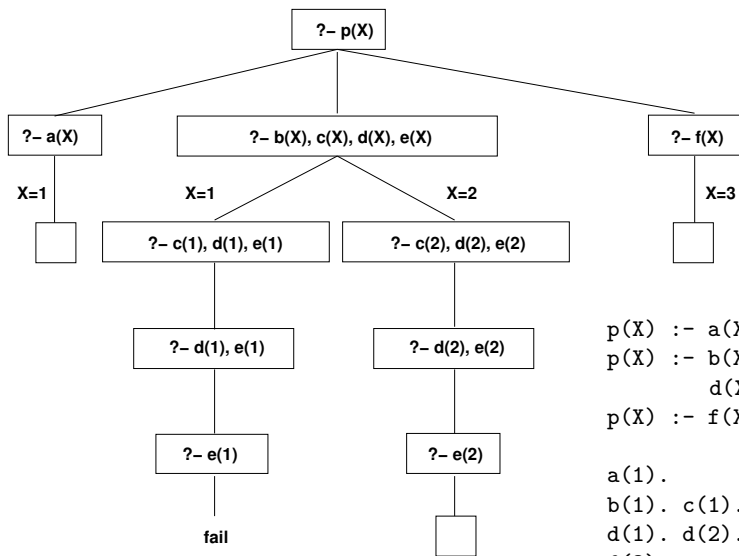

Příklad fungování řezu – bez řezu



```
p(X) :- a(X).
p(X) :- b(X), c(X),
        d(X), e(X).
p(X) :- f(X).

a(1).
b(1). c(1).
d(1). d(2). e(2).
f(3).
b(2). c(2).
```

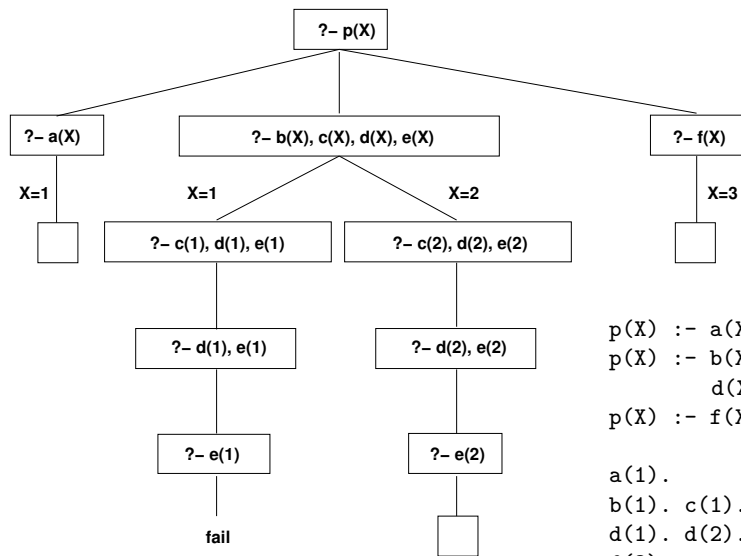
Příklad fungování řezu – bez řezu



`p(X) :- a(X).`
`p(X) :- b(X), c(X),`
`d(X), e(X).`
`p(X) :- f(X).`

`a(1).`
`b(1). c(1).`
`d(1). d(2). e(2).`
`f(3).`
`b(2). c(2).`

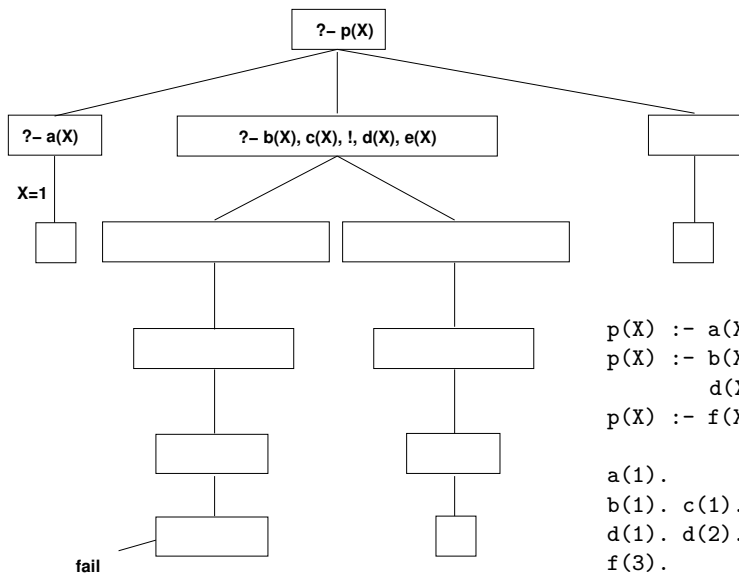
Příklad fungování řezu – s řezem



```
p(X) :- a(X).
p(X) :- b(X), c(X), !,
        d(X), e(X).
p(X) :- f(X).

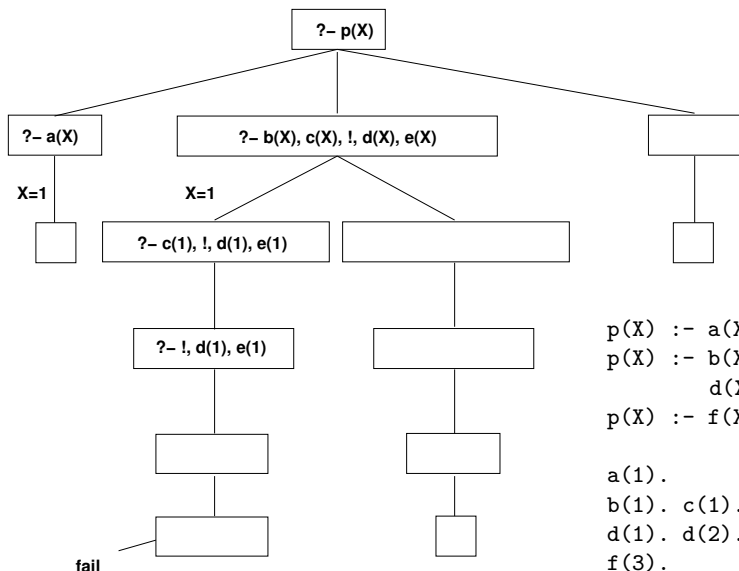
a(1).
b(1). c(1).
d(1). d(2). e(2).
f(3).
b(2). c(2).
```

Příklad fungování řezu – s řezem



```
p(X) :- a(X).  
p(X) :- b(X), c(X), !,  
        d(X), e(X).  
p(X) :- f(X).  
  
a(1).  
b(1). c(1).  
d(1). d(2). e(2).  
f(3).  
b(2). c(2).
```

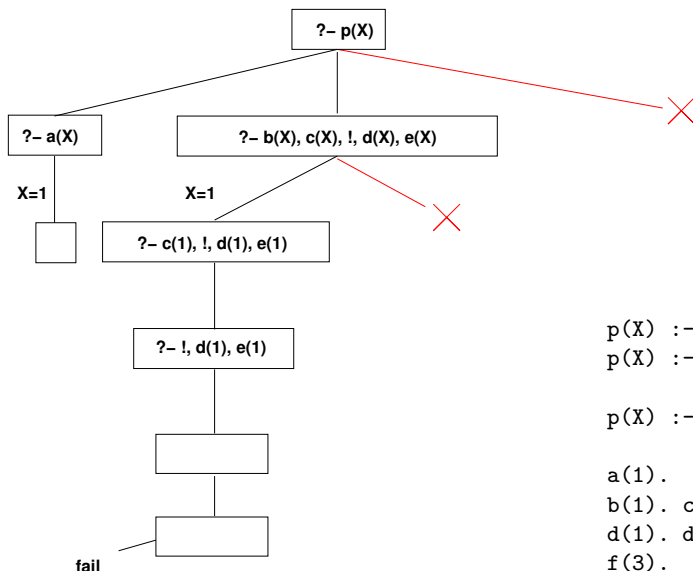
Příklad fungování řezu – s řezem



```
p(X) :- a(X).
p(X) :- b(X), c(X), !,
        d(X), e(X).
p(X) :- f(X).

a(1).
b(1). c(1).
d(1). d(2). e(2).
f(3).
b(2). c(2).
```

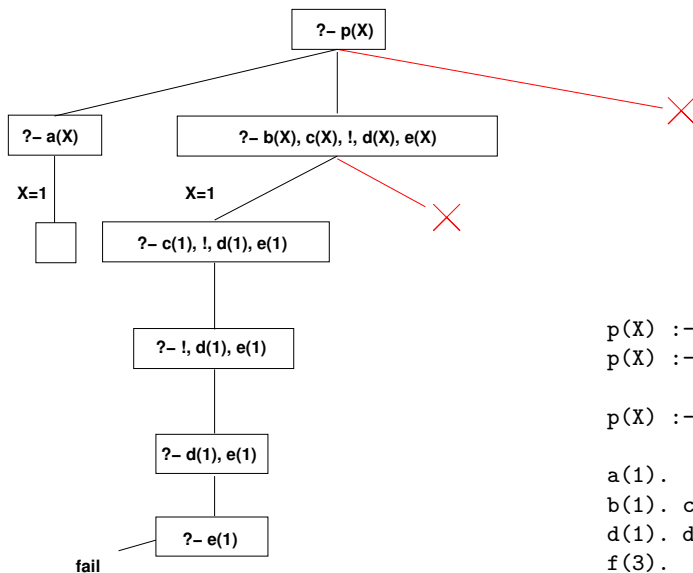
Příklad fungování řezu – s řezem



```
p(X) :- a(X).
p(X) :- b(X), c(X), !,
        d(X), e(X).
p(X) :- f(X).

a(1).
b(1). c(1).
d(1). d(2). e(2).
f(3).
b(2). c(2).
```

Příklad fungování řezu – s řezem



```
p(X) :- a(X).
p(X) :- b(X), c(X), !,
        d(X), e(X).
p(X) :- f(X).

a(1).
b(1). c(1).
d(1). d(2). e(2).
f(3).
b(2). c(2).
```

Popis

- Pokud se při řešení podcíle narazí v těle pravidla na operátor `!`, ostatní fakta a pravidla, se pro právě řešený cíl (ten, který se unifikoval s hlavou pravidla) neberou v potaz.

Příklad

- Porovnej chování následujících programů.

a) `a(X) :- X = 1.`

`a(X) :- X = 2.`

`?- a(X).`

`X = 1 ;`

`X = 2.`

b) `a(X) :- X = 1, !.`

`a(X) :- X = 2.`

`?- a(X).`

`X = 1.`

Popis

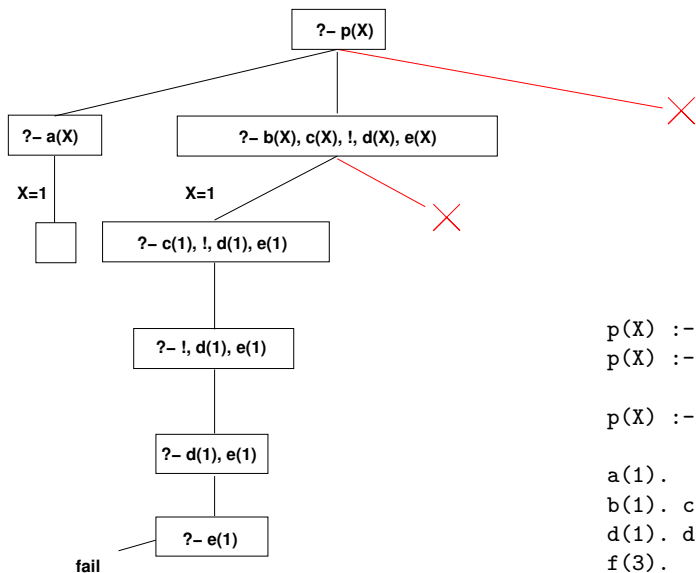
- Pokud se při řešení podcíle narazí v těle pravidla na operátor řezu, všechny unifikace vyplývající z podcílů vyskytujících se v těle pravidla před operátorem ! se fixují (jiné možnosti unifikace těchto podcílů se neuvažují).

Porovnejte

a) $a(X) :- X = 0.$
 $a(X) :- X = 1.$
 $b(X,Y) :- a(X), a(Y).$
 $?- b(X,Y).$
 $X = 0, Y = 0 ;$
 $X = 0, Y = 1 ;$
 $X = 1, Y = 0 ;$
 $X = 1, Y = 1.$

b) $a(X) :- X = 0.$
 $a(X) :- X = 1.$
 $b(X,Y) :- a(X), !, a(Y).$
 $?- b(X,Y).$
 $X = 0, Y = 0 ;$
 $X = 0, Y = 1.$

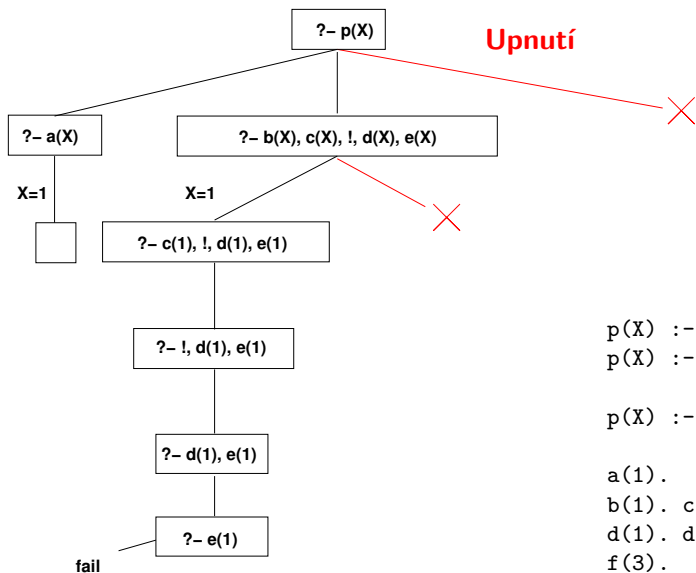
Příklad fungování řezu – vedlejší efekty



```
p(X) :- a(X).
p(X) :- b(X), c(X), !,
        d(X), e(X).
p(X) :- f(X).

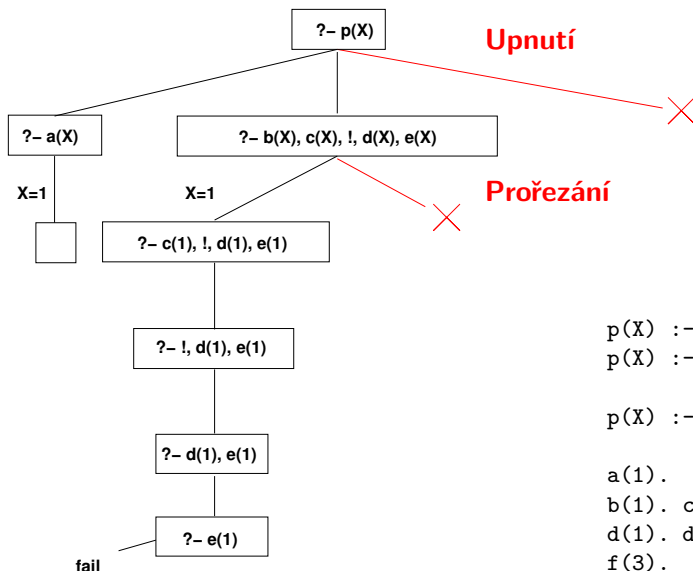
a(1).
b(1). c(1).
d(1). d(2). e(2).
f(3).
b(2). c(2).
```

Příklad fungování řezu – vedlejší efekty



```
p(X) :- a(X).  
p(X) :- b(X), c(X), !,  
        d(X), e(X).  
p(X) :- f(X).  
  
a(1).  
b(1). c(1).  
d(1). d(2). e(2).  
f(3).  
b(2). c(2).
```

Příklad fungování řezu – vedlejší efekty



```
p(X) :- a(X).  
p(X) :- b(X), c(X), !,  
        d(X), e(X).  
p(X) :- f(X).  
  
a(1).  
b(1). c(1).  
d(1). d(2). e(2).  
f(3).  
b(2). c(2).
```

Úkol

- Určete maximální možný výstup interpretru pro následující kód v Prologu na dotaz `?- b(X,Y)`.

Zadání 1

- `a(X) :- X = 0.`
`a(X) :- X = 1, !.`
`a(X) :- X = 2.`
`b(X,Y) :- a(X), a(Y).`

Úkol

- Určete maximální možný výstup interpretru pro následující kód v Prologu na dotaz `?- b(X,Y)`.

Zadání 1

- `a(X) :- X = 0.`
`a(X) :- X = 1, !.`
`a(X) :- X = 2.`
`b(X,Y) :- a(X), a(Y).`

Řešení 1

- `X = 0, Y = 0 ;`
`X = 0, Y = 1 ;`
`X = 1, Y = 0 ;`
`X = 1, Y = 1.`

Úkol

- Určete maximální možný výstup interpretru pro následující kód v Prologu na dotaz `?- b(X,Y)`.

Zadání 1

- `a(X) :- X = 0.`
`a(X) :- X = 1, !.`
`a(X) :- X = 2.`
`b(X,Y) :- a(X), a(Y).`

Řešení 1

- `X = 0, Y = 0 ;`
`X = 0, Y = 1 ;`
`X = 1, Y = 0 ;`
`X = 1, Y = 1.`

Zadání 2

- `a(X) :- X = 0.`
`a(X) :- X = 1, !.`
`a(X) :- X = 2.`
`b(X,Y) :- a(X), !, a(Y).`

Úkol

- Určete maximální možný výstup interpretru pro následující kód v Prologu na dotaz `?- b(X,Y)`.

Zadání 1

- `a(X) :- X = 0.`
`a(X) :- X = 1, !.`
`a(X) :- X = 2.`
`b(X,Y) :- a(X), a(Y).`

Řešení 1

- `X = 0, Y = 0 ;`
`X = 0, Y = 1 ;`
`X = 1, Y = 0 ;`
`X = 1, Y = 1.`

Zadání 2

- `a(X) :- X = 0.`
`a(X) :- X = 1, !.`
`a(X) :- X = 2.`
`b(X,Y) :- a(X), !, a(Y).`

Řešení 2

- `X = 0, Y = 0 ;`
`X = 0, Y = 1.`

Zelené řезы

- Odstraněním operátoru řezu se nemění sémantika programu (množina řešení po odstranění řezu je shodná).
- Řez je použit pouze z důvodů efektivity.
- Někdy se jako „modré“ označují řезы eliminující duplicity.

Červené řезы

- Odstraněním operátoru řezu se mění sémantika programu (po odstranění řezu, je možné nalézt další jiná řešení).

Obecná doporučovaná strategie

- Vyrobit funkční řešení bez řезů.
- Zvýšit efektivitu použitím „zelených“ řезů.
- Využít „červené řезы“ pouze pokud není vyhnutí, dobře okomentovat.

Zadání

- V Prologu naprogramujte predikáty `encodeRLE/2` a `decodeRLE/2`, které budou realizovat RLE kódování seznamů.
- V RLE kódování je každá n -tice stejných po sobě jdoucích prvků k v seznamu nahrazena uspořádanou dvojicí (n, k) .

Příklad použití

- `?- encodeRLE([a,a,a,b,b,c,d,d,e],X).`
`X = [(3,a),(2,b),(1,c),(2,d),(1,e)]`
- `?- decodeRLE([(5,1),(1,2),(3,3)], [1,1,1,1,1,2,3,3,3]).`
`true.`

IB015 Neimperativní programování

Programování s omezujícími podmínkami
a závěrečné zhodnocení

Jiří Barnat

Programování s omezujícími podmínkami

Vymezení pojmu

- Obecné neimperativní programovací paradigma.
- V množině možných řešení problému je hledané řešení popsáno pouze omezujícími podmínkami, které musí splňovat.
- Angl. „Constraint programming“.

Aplikace

- Problémy vedoucí na těžké kombinatorické řešení.
- Řízení, rozvrhování, plánování.
- DNA sequencing.

Vymezení pojmu

- Obecné neimperativní programovací paradigma.
- V množině možných řešení problému je hledané řešení popsáno pouze omezujícími podmínkami, které musí splňovat.
- Angl. „Constraint programming“.

Aplikace

- Problémy vedoucí na těžké kombinatorické řešení.
- Řízení, rozvrhování, plánování.
- DNA sequencing.
- StarTrek



Různé instance paradigmatu

- Podle typu proměnných, vystupujících v popisu problému.
- Pravdivostní hodnoty, Celočíselné hodnoty, Konečné množiny, Doména lineárních funkcí, ...

Postup řešení úloh

- | | |
|--|----------|
| ● Modelování problému v dané doméně. | Myšlenka |
| ● Specifikace proměnných a jejich rozsahů. | Program |
| ● Specifikace omezujících podmínek. | Program |
| ● Vymezení cíle. | Program |
| ● Zjednodušení zadání, propagace omezení. | Výpočet |
| ● Systematické procházení možných valuací a hledání vyhovujícího řešení. | Výpočet |

Hostitelské jazyky

- Řešiče uvažovaných úloh jsou obvykle součástí jiného hostitelského programovacího jazyka nebo systému.
- Prvním výrazným hostitelem byly jazyky vycházející z logického programovacího paradigmatu.
- **Constraint Logic Programming** (CLP).

Knihovny ve SWI-Prologu

- **clpfd**: Constraint Logic Programming over Finite Domains
`?- use_module(library(clpfd)).`
- **clpqr**: Constraint Logic Programming over Rationals and Reals
`?- use_module(library(clpqr)).`

Výrazy v celočíselné doméně

- Celé číslo je výrazem v celočíselné doméně.
- Proměnná je výrazem s celočíselné doméně.
- Jsou-li $E1$ a $E2$ výrazy v celočíselné doméně, pak
 - $E1$ (unární mínus)
 - $E1+E2$ (součet), $E1 * E2$ (součin), $E1 - E2$ (rozdíl),
 - $E1 \wedge E2$ (umocnění), $\min(E1, E2)$, $\max(E1, E2)$,
 - $E1 / E2$ (celočíselné dělení ořezáním),
 - $E1 \text{ rem } E2$ (zbytek po dělení /)jsou výrazy v celočíselné doméně.

Omezující podmínky

- Relační operátory předřazené znakem #.
- $E1 \#>= E2$, $E1 \#<= E2$,
- $E1 \#= E2$, $E1 \#\backslash= E2$,
- $E1 \#> E2$, $E1 \#< E2$,

Logické spojky

- $\neg Q$ – Negace
- $P \vee Q$ – Disjunkce
- $P \wedge Q$ – Konjunkce
- $P \iff Q$ – Ekvivalence
- $P \implies Q$ – Implikace
- $P \Leftarrow Q$ – Implikace

Číselná reprezentace logických hodnot

- Pravda/Nepravda jsou realizovány hodnotami 1 a 0.
- Relační operátory jsou aplikovatelné na tyto celočíselné hodnoty.

Domény volných proměnných

?Var in +Domain

- Proměnná `var` má hodnotu z domény `Domain`.

+Vars ins +Domain

- Proměnné v seznamu `Vars` mají hodnotu z domény `Domain`.

all_different(Vars)

- Každá proměnná ze seznamu `Vars` má jinou hodnotu.

Specifikace domény

- N — jednoprvková množina obsahující celé číslo N .
- `Lower..Upper` — všechna celá čísla I taková, že $\text{Lower} \leq I \leq \text{Upper}$, `Lower` musí být celé číslo, nebo term `inf` označující záporné nekonečno, podobně `Upper` musí být celé číslo, nebo term `sup` označující kladné nekonečno.
- `Domain1 \ / Domain2` — sjednocení domén `Domain1` a `Domain2`.

Pozorování

- Následující dotazy jsou řešeny pouze fází propagace omezujících podmínek (neprochází se systematicky prostor všech možných přiřazení hodnot volným proměnným).

Příklady dotazů na clpfd

- `?- X #\= 20.`
`X in inf..19\21..sup.`
- `?- X*X #= 144.`
`X in -12\12.`
- `?- 4*X + 2*Y #= 24, X + Y #= 9, X #>= 0, Y #>= 0.`
`X = 3, Y = 6.`
- `?- X #= Y #<==> B, X in 0..3, Y in 4..5.`
`B = 0, X in 0..3, Y in 4..5.`

Popis

- Kryptoaritmetické puzzle, každé písmeno představuje jednu cifru, žádná dvě různá písmena nepředstavují tutéž cifru. Jaké je mapování písmen na číslice?

Zadání pro clpfd

- ```
puzzle([S,E,N,D]+ [M,O,R,E] = [M,O,N,E,Y]) :-
 Vars = [S,E,N,D,M,O,R,Y],
 Vars ins 0..9,
 all_different(Vars),
 S*1000 + E*100 + N*10 + D +
 M*1000 + O*100 + R*10 + E #=
M*10000 + O*1000 + N*100 + E*10 + Y,
M #\= 0, S #\= 0.
```

## **label(+Vars)**

- Zahájí hledání vyhovujících hodnot proměnných `Vars`.
- Totéž, co `labeling([],Vars)`.

## **labeling(+Options,+Vars)**

- Zahájí hledání vyhovujících hodnot proměnných `Vars`.
- Parametry uvedené v seznamu `Options` ovlivňují způsob enumerace hledaných hodnot.

## **Parametry hledání**

- Pořadí fixace proměnných.
- Směr prohledávání domén.
- Strategie větvení prohledávaného stromu.

## Pořadí fixace proměnných

- `leftmost` — přiřazuje hodnoty proměnným v tom pořadí, ve kterém jsou uvedeny.
- `ff` — preferuje proměnné s menšími doménami.
- `ffc` — preferuje proměnné, které participují v největším počtu omezujících podmínek.
- `min` — preferuje proměnná s nejmenší spodní závorou.
- `max` — preferuje proměnná s největší horní závorou.

## Směr prohledávání domén

- `up` — zkouší prvky domény od nejmenších k největším.
- `down` — zkouší prvky domény od největších k nejmenším.



## Odpověď clpfd bez prohledávání

- Vars = [9, E, N, D, 1, 0, R, Y],  
S = 9, M = 1, O = 0,  
E in 4..7, N in 5..8, D in 2..8, R in 2..8, Y in 2..8,  
all\_different([9, E, N, D, 1, 0, R, Y]),  
1000\*9+91\*E+ -90\*N+D+ -9000\*1+ -900\*0+10\*R+ -1\*Y#=0.

## Požadavek na prohledávání

- Uvedením podcíle label([S,E,N,D]).

## Odpověď clpfd s vyhledáním valuací proměnných S,E,N a D

- Vars = [9, 5, 6, 7, 1, 0, 8, 2],  
S = 9, E = 5, N = 6, D = 7,  
M = 1, O = 0, R = 8, Y = 2 ;  
false.

**sum**(+Vars,+Rel,?Expr)

- Součet hodnot proměnných v seznamu Vars je v relaci Rel s hodnotou výrazu Expr.

**scalar\_product**(+Cs,+Vs,+Rel,?Expr)

- Skalární součin seznamu čísel Cs s čísly, nebo proměnnými v seznamu Vs, je v relaci Rel s hodnotou výrazu Expr.

**serialized**(+Starts,+Durations)

- Pro hodnoty Starts=[S1,...,SN] a Durations=[D1,...,DN], platí, že úlohy začínající v čase SI a trvající dobu DI se nepřekrývají, tj.  $SI+DI \leq SJ$  nebo  $SJ+DJ \leq SI$ .

## Jiné použití clpfd v Prologu

- Aritmetické vyhodnocování v celých číslech bez nutnosti instanciace argumentů aritmetických operací (propagace hodnot všemi směry).

## Příklad

- `n_factorial(0,1).`  
`n_factorial(N,F) :-`  
    `N #> 0, N1 #= N - 1, F #= N * F1,`  
    `n_factorial(N1,F1).`
- `?- n_factorial(N,1).`  
`N = 0 ;`  
`N = 1 ;`  
`false.`

## Einsteinova hádanka

## Popis situace

- Je 5 domů, z nichž každý má jinou barvu.
- V každém domě žije jeden člověk, který pochází z jiného státu.
- Každý člověk pije nápoj, kouří jeden druh cigaret a chová jedno zvíře.
- Žádný z nich nepije stejný nápoj, nekouří stejný druh cigaret a nechová stejné zvíře.

## Otázka

- Kdo chová rybičky?
- Za následujících předpokladů ...

# Zadání hádanky – nápovědy

- 1 Brit bydlí v červeném domě.
- 2 Švéd chová psa.
- 3 Dán pije čaj.
- 4 Zelený dům stojí hned nalevo od bílého.
- 5 Majitel zeleného domu pije kávu.
- 6 Ten, kdo kouří PallMall, chová ptáka.
- 7 Majitel žlutého domu kouří Dunhill.
- 8 Ten, kdo bydlí uprostřed řady domů, pije mléko.
- 9 Nor bydlí v prvním domě.
- 10 Ten, kdo kouří Blend, bydlí vedle toho, kdo chová kočku.
- 11 Ten, kdo chová koně, bydlí vedle toho, kdo kouří Dunhill.
- 12 Ten, kdo kouří BlueMaster, pije pivo.
- 13 Němec kouří Prince.
- 14 Nor bydlí vedle modrého domu.
- 15 Ten, kdo kouří Blend, má souseda, který pije vodu.

## **Copy-paste, aneb programátorova smrt**

- `einstein_0.pl`

## **Přeuspořádání, aneb optimalizace v praxi**

- `einstein_1.pl`

## **Transformace na řešení absolventa FI**

- `einstein_2.pl`
- `einstein_3.pl`
- `einstein_4.pl`
- `einstein_5.pl`

## Deklarativní versus imperativní



## Princip

- Programem je především formulace cíle a vztahu požadovaného výsledku výpočtu k daným vstupům.
- Popis postupu výpočtu není požadován, nebo je druhotným vstupem zadávaným kvůli zvýšení efektivity výpočtu.

## Výhody a nevýhody

- + Kratší a srozumitelnější kód.
- + Méně skrytých chyb.
- Náročnější tvorba kódu, požaduje schopnost abstrakce.
- Riziko neefektivního řešení.
- Obtížná přímá kontrola výpočetního HW.

## Princip

- Programem je popis transformace zadaných vstupů na požadovaný výsledek.
- Popis vztahů výsledku vzhledem ke vstupům není požadován, nebo je do programu vkládán za účelem kontroly korektnosti popisované transformace.

## Výhody a nevýhody

- + Detailní kontrola nad postupem výpočtu.
- + Efektivní využití dostupného HW .
- + Snazší tvorba kódu.
- Více prostoru pro zanesení chyb.
- Skryté a dlouho neodhalené chyby.
- Nečitelnost významu programu.

## Jazykové konstrukce

- Nepojmenované funkce (lambda funkce).
- Parametrický polymorfismus / generické programování.
- Silná typová kontrola.
- Sémantika jazyka oddělená od výpočetního HW.

## Programátorský styl

- Přenos kontroly typů z doby za běhu programu do doby kompilace.
- Deklarace vzájemných vztahů vnitřních dat v imperativním programu.
- Programování bez pomocných přepisovatelných proměnných.

## Původně imperativním stylem

- ```
int vysledek=1;
for (int i=1; i<=N; i++)
{
    vysledek=vysledek*i;
}
print vysledek;
```

Nově deklarativním stylem

- ```
int fact(int n)
{
 if (n==0) return 1;
 else return n*fact(n-1);
}
print fact(N);
```

## Původně imperativním stylem

- ```
int vysledek=1;
for (int i=1; i<=N; i++)
{
    vysledek=vysledek*i;
}
print vysledek;
```

- Co to vlastně počítá?

Nově deklarativním stylem

- ```
int fact(int n)
{
 if (n==0) return 1;
 else return n*fact(n-1);
}
print fact(N);
```

## Původně imperativním stylem

- ```
int vysledek=1;
for (int i=1; i<=N; i++)
{
    vysledek=vysledek*i;
}
print vysledek;
```

- Co to vlastně počítá?
- Přepisovatelná proměnná navíc, těžší optimalizace.

Nově deklarativním stylem

- ```
int fact(int n)
{
 if (n==0) return 1;
 else return n*fact(n-1);
}
print fact(N);
```

## Původně imperativním stylem

- ```
int vysledek=1;
for (int i=1; i<=N; i++)
{
    vysledek=vysledek*i;
}
print vysledek;
```

- Co to vlastně počítá?
- Přepisovatelná proměnná navíc, těžší optimalizace.
- Větší prostor pro zanesení chyb ($i=1, i \leq N$).

Nově deklarativním stylem

- ```
int fact(int n)
{
 if (n==0) return 1;
 else return n*fact(n-1);
}
print fact(N);
```

## Původně imperativním stylem

- ```
int vysledek=1;
for (int i=1; i<=N; i++)
{
    vysledek=vysledek*i;
}
print vysledek;
```

- Co to vlastně počítá?
- Přepisovatelná proměnná navíc, těžší optimalizace.
- Větší prostor pro zanesení chyb ($i=1$, $i \leq N$).
- „Skryté“ chování pro $N=0$.

Nově deklarativním stylem

- ```
int fact(int n)
{
 if (n==0) return 1;
 else return n*fact(n-1);
}
print fact(N);
```



## Původně imperativním stylem

- ```
int vysledek=1;
for (int i=1; i<=N; i++)
{
    vysledek=vysledek*i;
}
print vysledek;
```

- Co to vlastně počítá?
- Přepisovatelná proměnná navíc, těžší optimalizace.
- Větší prostor pro zanesení chyb ($i=1, i \leq N$).
- „Skryté“ chování pro $N=0$.

Nově deklarativním stylem

- ```
int fact(int n)
{
 if (n==0) return 1;
 else return n*fact(n-1);
}
print fact(N);
```

- Jasně chování pro  $N=0$ .

## Původně imperativním stylem

```
• int vysledek=1;
 for (int i=1; i<=N; i++)
 {
 vysledek=vysledek*i;
 }
 print vysledek;
```

- Co to vlastně počítá?
- Přepisovatelná proměnná navíc, těžší optimalizace.
- Větší prostor pro zanesení chyb ( $i=1, i \leq N$ ).
- „Skryté“ chování pro  $N=0$ .

## Nově deklarativním stylem

```
• int fact(int n)
 {
 if (n==0) return 1;
 else return n*fact(n-1);
 }
 print fact(N);
```

- Jasně chování pro  $N=0$ .
- Pojmenovaná funkce, syntaktická indicie pro sémantický význam.

**A to je konec ...**

## Co si odneseme do života ...

- Funkcionální výpočetní paradigma.
- Solidní základy programovacího jazyka Haskell.
- Intuitivní základy programování v Prologu.

## Čím ještě nám byl kurz prospěšný ...

- **Deklarativní návyky při návrhu programů a algoritmů mnohokrát využijeme v naší (převážně imperativní) informatické praxi.**
- Mentální posilovna.

## Co si odneseme do života ...

- Funkcionální výpočetní paradigma.
- Solidní základy programovacího jazyka Haskell.
- Intuitivní základy programování v Prologu.

## Čím ještě nám byl kurz prospěšný ...

- **Deklarativní návyky při návrhu programů a algoritmů mnohokrát využijeme v naší (převážně imperativní) informatické praxi.**
- Mentální posilovna.



## **Přednášejícího studentům**

- Za vzornou docházku a přípravu jak na přednášky, tak i na cvičení, a zkouškové písemky, a za celkově poctivý přístup ke studiu.

## **Studentů přednášejícímu**

- Formou zpětné vazby například vyplněním studentské ankety a upozorněním na zásadní, ale i okrajové nedostatky jak přednášejícího, tak i jím připravených studijních materiálů.

The goal of IB015

