

Monády pro čtení a/nebo zapisování stavu (Reader, Writer, State)

IB016 Seminář z funkcionálního programování

Adam Matoušek, Henrieta Michelová
(původní autoři slajdů Vladimír Štill, Martin Ukrop)

Fakulta informatiky, Masarykova univerzita

Jaro 2021

Monáda \approx abstrakce výpočtu.

```
class Applicative m => Monad m where
  (>>=) :: m a -> (a -> m b) -> m b
  return :: a -> m a
```

- `return` `x` vyrábí „konstantní výpočet“ hodnoty `x`
- `mx >>= f` komponuje výpočty: pomocí výsledku výpočtu `mx` je vytvořen nový výpočet (`f x`).

Připomenutí: monády

IO: výpočet se vstupně-výstupními efekty

- `echo = getLine >>= putStrLn >> echo`

Maybe: výpočet, který může selhat

- `lookup "xmatous3" login2uid`
`>>= flip lookup uid2uco`
`>>= flip lookup uco2name ~\to* Just "Adam"`
- zobecnění: **Either** e – „selhání s odůvodněním“

[]: výpočet s více možnými výsledky

- `[1,4] >>= \x -> [pred x, x, succ x] ~\to* [0..5]`

Dvojice jako aplikativní funktor

- $((,) w)$ je typový k-tor pro dvojice s první složkou typu w
- $((,) w)$ je funktor:
`fmap` $:: (a \rightarrow b) \rightarrow (w, a) \rightarrow (w, b)$

Dvojice jako aplikativní funktor

- $((,) w)$ je typový k-tor pro dvojice s první složkou typu w

- $((,) w)$ je funktor:

`fmap` $:: (a \rightarrow b) \rightarrow (w, a) \rightarrow (w, b)$

`fmap` $f (w, x) = (w, f x)$

Dvojice jako aplikativní funktor

- $((,) w)$ je typový k-tor pro dvojice s první složkou typu w

- $((,) w)$ je funktor:

```
fmap :: (a -> b) -> (w, a) -> (w, b)
```

```
fmap f (w, x) = (w, f x)
```

- je $((,) w)$ aplikativní funktor?

```
pure :: a -> (w, a)
```

```
pure x =
```

```
<*> :: (w, a -> b) -> (w, a) -> (w, b)
```

```
(w1, f) <*> (w2, x) =
```

Dvojice jako aplikativní funktor

- $((,) w)$ je typový k-tor pro dvojice s první složkou typu w

- $((,) w)$ je funktor:

```
fmap :: (a -> b) -> (w, a) -> (w, b)
```

```
fmap f (w, x) = (w, f x)
```

- je $((,) w)$ aplikativní funktor?

```
pure :: a -> (w, a)
```

```
pure x = ( :??: , x)
```

- musíme umět zbuhdarma vyrobit hodnotu typu w

```
<*> :: (w, a -> b) -> (w, a) -> (w, b)
```

```
(w1, f) <*> (w2, x) =
```

Dvojice jako aplikativní funktor

- $((,) w)$ je typový k-tor pro dvojice s první složkou typu w

- $((,) w)$ je funktor:

```
fmap :: (a -> b) -> (w, a) -> (w, b)
```

```
fmap f (w, x) = (w, f x)
```

- je $((,) w)$ aplikativní funktor?

```
pure :: a -> (w, a)
```

```
pure x = ( :???: , x)
```

- musíme umět zbuďdarma vyrobit hodnotu typu w

```
<*> :: (w, a -> b) -> (w, a) -> (w, b)
```

```
(w1, f) <*> (w2, x) = ( :????: , f x)
```

- musíme umět hodnoty typu w kombinovat

Dvojice jako aplikativní funktor

- $((,) w)$ je typový k-tor pro dvojice s první složkou typu w

- $((,) w)$ je funktor:

```
fmap :: (a -> b) -> (w, a) -> (w, b)
```

```
fmap f (w, x) = (w, f x)
```

- je $((,) w)$ aplikativní funktor?

```
pure :: a -> (w, a)
```

```
pure x = ( :???: , x)
```

- musíme umět zbuhdarma vyrobit hodnotu typu w

```
<*> :: (w, a -> b) -> (w, a) -> (w, b)
```

```
(w1, f) <*> (w2, x) = ( :????: , f x)
```

- musíme umět hodnoty typu w kombinovat
- nechť je typ w monoidem!

Dvojice jako aplikativní funktor

- $((,) w)$ je typový k-tor pro dvojice s první složkou typu w

- $((,) w)$ je funktor:

```
fmap :: (a -> b) -> (w, a) -> (w, b)
```

```
fmap f (w, x) = (w, f x)
```

- je $((,) w)$ aplikativní funktor?

```
pure :: Monoid w => a -> (w, a)
```

```
pure x = (mempty, x)
```

- musíme umět zbuhdarma vyrobit hodnotu typu w

```
<*> :: Monoid w => (w, a -> b) -> (w, a) -> (w, b)
```

```
(w1, f) <*> (w2, x) = (w1 <> w2, f x)
```

- musíme umět hodnoty typu w kombinovat
- necht' je typ w monoidem!

Dvojice jako aplikativní funktor

- $((,) w)$ je typový k-tor pro dvojice s první složkou typu w

- $((,) w)$ je funktor:

```
fmap :: (a -> b) -> (w, a) -> (w, b)
```

```
fmap f (w, x) = (w, f x)
```

- je $((,) w)$ aplikativní funktor?

```
pure :: Monoid w => a -> (w, a)
```

```
pure x = (mempty, x)
```

- musíme umět zbuĎdarma vyrobit hodnotu typu w

```
<*> :: Monoid w => (w, a -> b) -> (w, a) -> (w, b)
```

```
(w1, f) <*> (w2, x) = (w1 <> w2, f x)
```

- musíme umět hodnoty typu w kombinovat

- nechť je typ w monoidem!

- ★ proč nestačí libovolný typ s nulární a binární operací?

```
instance Monoid w => Monad ((,) w) where
  (>>=) :: ... => (w, a) -> (a -> (w, b)) -> (w, b)
```

```
instance Monoid w => Monad ((,) w) where
  (>>=) :: ... => (w, a) -> (a -> (w, b)) -> (w, b)
  (w1, x) >>= f = let (w2, y) = f x in
                   (w1 <> w2, y)
```

```
instance Monoid w => Monad ((,) w) where
  (>>=) :: ... => (w, a) -> (a -> (w, b)) -> (w, b)
  (w1, x) >>= f = let (w2, y) = f x in
                   (w1 <> w2, y)
```

- výpočet, který navíc produkuje výstup typu `w`
- „boční“ výstupy všech výpočtů se kumulují operátorem `<>`
- samotný výsledek je ve druhé složce dvojice
- typické použití: logy

Příklad: monáda písáře

```
loudNeg :: Int -> ([String], Int)
loudNeg n = ("neg " ++ show n, negate n)

loudPlus, loudMinus :: Int -> Int -> ([String], Int)
loudPlus n m = (show n ++ " + " ++ show m, n + m)
loudMinus n m = loudNeg m >>= loudPlus n

loudTimes :: Int -> Int -> ([String], Int)
loudTimes 0 _ = pure 0
loudTimes n m
  | n > 0 = do n' <- loudMinus n 1
               m' <- loudTimes n' m
               loudPlus m' m
  | n < 0 = loudNeg n >>= flip loudTimes m >>= loudNeg

loudTimes (-2) 3  $\rightsquigarrow^*$  ("neg -2", "neg 1", "2 + -1", "neg 1",
 $\hookrightarrow$  "1 + -1", "0 + 3", "3 + 3", "neg 6"), -6)
```

- existuje také „explicitně pojmenovaná“ monáda **Writer** w:
`newtype Writer w a = Writer {runWriter :: (a, w)}`
(pozor, prvky dvojice jsou naopak)
- uvnitř obou písářů lze použít pomocné funkce:¹
`tell :: w -> m ()` *-- tedy w -> (w, ())*
pouze zapíše „do logu“
`listen :: m a -> m (a, w)`
zachytí (i zapíše) „log“ zadaného výpočtu
`sensor :: (w -> w) -> m a -> m a`
před zápisem změní „log“ zadaného výpočtu.
- vše hledejte v modulu **Control.Monad.Writer** balíku `mtl`
- striktní (nelíná) verze: **Control.Monad.Writer.Strict**

¹je to zajištěno typovou třídou **MonadWriter** sdružující písáře všeho druhu

Funkce jako aplikativní funktor

- $((\rightarrow) r)$ je typový konstruktor pro funkce z r
- $((\rightarrow) r)$ je funktor:

```
-- :: (a -> b) -> f    a -> f    b
fmap :: (a -> b) -> (r -> a) -> (r -> b)
```

Funkce jako aplikativní funktor

- $((\rightarrow) r)$ je typový konstruktor pro funkce z r
- $((\rightarrow) r)$ je funktor:

```
-- :: (a -> b) -> f a -> f b
fmap :: (a -> b) -> (r -> a) -> (r -> b)
fmap f ra = \k -> f (ra k)      -- === f . ra
```

Funkce jako aplikativní funktor

- $((\rightarrow) r)$ je typový konstruktor pro funkce z r
- $((\rightarrow) r)$ je funktor:

```
-- :: (a -> b) -> f a -> f b
fmap :: (a -> b) -> (r -> a) -> (r -> b)
fmap f ra = \k -> f (ra k)      -- === f . ra
```

- je $((\rightarrow) r)$ aplikativní funktor?

```
pure :: a -> (r -> a)
pure x =
<*> :: (r -> (a -> b)) -> (r -> a) -> (r -> b)
rf <*> ra =
```

Funkce jako aplikativní funktor

- $((\rightarrow) r)$ je typový konstruktor pro funkce z r
- $((\rightarrow) r)$ je funktor:

```
-- :: (a -> b) -> f a -> f b
fmap :: (a -> b) -> (r -> a) -> (r -> b)
fmap f ra = \k -> f (ra k)      -- === f . ra
```

- je $((\rightarrow) r)$ aplikativní funktor?

```
pure :: a -> (r -> a)
pure x = const x
<*> :: (r -> (a -> b)) -> (r -> a) -> (r -> b)
rf <*> ra =
```

Funkce jako aplikativní funktor

- $((\rightarrow) r)$ je typový konstruktor pro funkce z r
- $((\rightarrow) r)$ je funktor:

```
-- :: (a -> b) -> f    a -> f    b
fmap :: (a -> b) -> (r -> a) -> (r -> b)
fmap f ra = \k -> f (ra k)    -- === f . ra
```

- je $((\rightarrow) r)$ aplikativní funktor?

```
pure :: a -> (r -> a)
pure x = const x
<*> :: (r -> (a -> b)) -> (r -> a) -> (r -> b)
rf <*> ra = \k -> (rf k) (ra k)
```

Funkce jako aplikativní funktor

- `((->) r)` je typový konstruktor pro funkce z `r`

- `((->) r)` je funktor:

```
-- :: (a -> b) -> f    a -> f    b
fmap :: (a -> b) -> (r -> a) -> (r -> b)
fmap f ra = \k -> f (ra k)    -- === f . ra
```

- je `((->) r)` aplikativní funktor?

```
pure :: a -> (r -> a)
pure x = const x
<*> :: (r -> (a -> b)) -> (r -> a) -> (r -> b)
rf <*> ra = \k -> (rf k) (ra k)
```

- ★ rozmyslete si, zda jsou splněna pravidla pro **Applicative**

```
instance Monad ((->) r) where
    -- :: m a -> (a -> m b) -> m b
    (>>=) :: (r -> a) -> (a -> (r -> b)) -> (r -> b)
```

```
instance Monad ((->) r) where
    -- :: m a -> (a -> m b) -> m b
    (>>=) :: (r -> a) -> (a -> (r -> b)) -> (r -> b)
    ra >>= f = \k -> f (ra k) k
```



```
instance Monad ((->) r) where
    -- :: m a -> (a -> m b) -> m b
    (>>=) :: (r -> a) -> (a -> (r -> b)) -> (r -> b)
    ra >>= f = \k -> f (ra k) k
```

- výpočet, který čte kontext typu `r`
- všechny komponované výpočty dostanou týž kontext
- typické použití: konfigurace

Příklad: monáda čtenáře

```
import Data.Map (Map)
import qualified Data.Map as Map
import Control.Applicative (liftA2)

data Formula = Var String
              | And Formula Formula
              | Or  Formula Formula
              | Not Formula
              deriving (Eq, Ord, Show)

type Valuation = Map String Bool
eval :: Formula -> (Valuation -> Bool)
eval (Var v)    = Map.findWithDefault False v
eval (And x y) = do lhs <- eval x
                    if not lhs then pure False
                               else eval y
eval (Or  x y) = liftA2 (||) (eval x) (eval y)
eval (Not x)   = not <$> eval x
```

- existuje také „explicitně pojmenovaná“ monáda **Reader** `r`:
`newtype Reader r a = Reader {runReader :: r -> a}`
- uvnitř obou čtenářů lze použít pomocné funkce:²
`ask :: m r -- r -> r`
přečte kontext (např. `do {ctx <- ask; ...}`)
`asks :: (r -> a) -> m a`
čtení přes „getter“ (např. `do {x <- asks fst; ...}`)
`local :: (r -> r) -> m a -> m a`
`--"--- :: (r -> r) -> (r -> a) -> (r -> a)`
spustí výpočet s lokálně změněným kontextem
- vše hledejte v modulu **Control.Monad.Reader** balíku `mtl`

²Opět je to zajištěno typovou třídou **MonadReader**, jíž jsou **Reader** `r` i `((->) r)` instancemi.

Omezení čtenářů a písarů

- **Writer** w neumí číst výstupy předchozích výpočtů
- přes **listen** umí číst výstupy vnořených výpočtů

Omezení čtenářů a písarů

- **Writer** `w` neumí číst výstupy předchozích výpočtů
- přes `listen` umí číst výstupy vnořených výpočtů
- **Reader** `r` neumí měnit kontext navazujícím výpočtům
- přes `local` umí měnit kontext vnořených výpočtů

Omezení čtenářů a písářů

- **Writer** `w` neumí číst výstupy předchozích výpočtů
- přes `listen` umí číst výstupy vnořených výpočtů
- **Reader** `r` neumí měnit kontext navazujícím výpočtům
- přes `local` umí měnit kontext vnořených výpočtů
- občas bychom chtěli sdílet napříč výpočty měnící se informaci

Omezení čtenářů a písářů

- **Writer** `w` neumí číst výstupy předchozích výpočtů
- přes `listen` umí číst výstupy vnořených výpočtů
- **Reader** `r` neumí měnit kontext navazujícím výpočtům
- přes `local` umí měnit kontext vnořených výpočtů
- občas bychom chtěli sdílet napříč výpočty měnící se informaci
- příklad: při prohledávání grafu je potřeba udržovat množinu navštívených vrcholů
- příklad: generátor pseudonáhodných čísel si udržuje sémě (*seed*), které se po každém vygenerovaném čísle změní

```
newtype State s a = State {runState :: s -> (a, s)}
```

- = funkce čtoucí stav typu `s` a vracející hodnotu typu `a` a změněný stav
- v modulu `Control.Monad.State` (příp. `.Strict`³) z `mtl`
- Co znamenají typy `a -> State s b`, `b -> State s c`
- Jak se skládají takové funkce?

³pozor, striktní je pouze sekvencování, nikoli operace se stavem


```
newtype State s a = State {runState :: s -> (a, s)}
```

- = funkce čtoucí stav typu `s` a vracející hodnotu typu `a` a změněný stav
- v modulu `Control.Monad.State` (příp. `.Strict`³) z `mtl`
- Co znamenají typy `a -> State s b`, `b -> State s c`
- Jak se skládají takové funkce?
Výsledný stav první se předá jako iniciální stav druhé.

³pozor, striktní je pouze sekvencování, nikoli operace se stavem

```
newtype State s a = State {runState :: s -> (a, s)}
```

- = funkce čtoucí stav typu `s` a vracející hodnotu typu `a` a změněný stav
- v modulu `Control.Monad.State` (příp. `.Strict`³) z `mtl`
- Co znamenají typy `a -> State s b`, `b -> State s c`
- Jak se skládají takové funkce?
Výsledný stav první se předá jako iniciální stav druhé.
- Instance `Functor`, `Applicative` a `Monad` jsou ponechány čtenáři jako cvičení.

³pozor, striktní je pouze sekvencování, nikoli operace se stavem

Funkce pro práci se stavem

- `get :: State s s` přečte stav
- `gets :: (s -> a) -> State s a` čtení přes „getter“
- `put :: s -> State s ()` zapíše nový stav
- `modify :: (s -> s) -> State s ()` změní stav
- `modify' :: (s -> s) -> State s ()` změní stav striktně
- `evalState :: State s a -> s -> a` zahodí konc. stav

★ balík `lens` nabízí funkce/operátory pro přístup ke stavu
(např. vlnovka v operátorech nahrazena rovnítkem)
příklad: hra Pong napsaná pomocí `State` a `lens`

Příklad: průchod grafem

```
type Edge = (Vertex, Vertex)
type Stamp = (Vertex, Int, Int)

dfs :: Vertex -> [Edge] -> State (Int, Set Vertex) [Stamp]
dfs v es = do
  _2 %= Set.insert v
  tDisc <- gets fst
  _1 += 1
  let succs = snd <$> filter ((== v).fst) es
      succStamps <- forM succs $ \s -> do
          visited <- gets snd
          if s `elem` visited then return []
              else dfs s es
  tFin <- gets fst
  _1 += 1
  return $ (v, tDisc, tFin) : concat succStamps

dfs' :: Vertex -> [Edge] -> [Stamp]
dfs' v es = evalState (dfs v es) (1, Set.empty)
```