Уменьшение цены абстракции при встраивании реляционного DSL в OCaml

Дмитрий Косарев

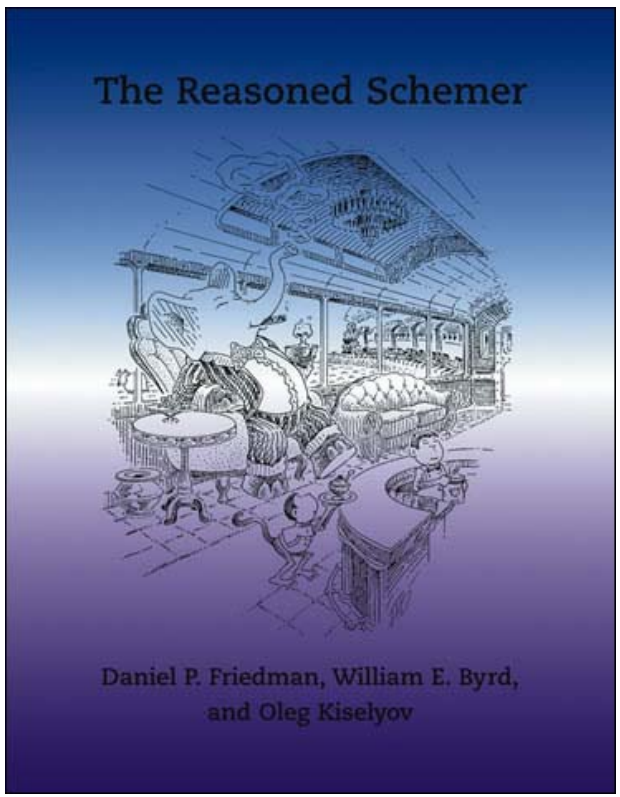
Санкт-Петербургский Государтсвенный Университет
JetBrains Research

16 декабря, 2017

Реляционное программирование на miniKanren

От программ-функций к программам-отношениям:

$$f : X \to Y \rightsquigarrow f^o \subseteq X \times Y$$



- Изначально DSL для Scheme/Racket с довольно минималистичной реализацией
- Семейство языков (μKanren, α-Kanren, cKanren, и т.д.)
- Встраивается как DSL в широкий набор языков (включая OCaml, Haskell, Scala, и т.д.)
- Daniel P. Friedman, William Byrd and Oleg Kiselyov. The Reasoned Schemer, The MIT Press, Cambridge, MA, 2005

Пример: реляционное слияние списков (OCaml/OCanren/miniKanren)

$\texttt{append}: \alpha\,\texttt{list} \to \alpha\,\texttt{list} \to \alpha\,\texttt{list}$

$\texttt{append}^o \subseteq \alpha\,\texttt{list} \times \alpha\,\texttt{list} \times \alpha\,\texttt{list}$

```
let rec append xs ys =
  match xs with
  | []      → ys
  | h :: tl →
      h :: (append tl ys)
```

Пример: реляционное слияние списков (OCaml/OCanren/miniKanren)

$\texttt{append}: \alpha\,\texttt{list} \to \alpha\,\texttt{list} \to \alpha\,\texttt{list}$

```
let rec append xs ys =
  match xs with
  | []      → ys
  | h :: tl →
      h :: (append tl ys)
```

$\texttt{append}^o \subseteq \alpha\,\texttt{list} \times \alpha\,\texttt{list} \times \alpha\,\texttt{list}$

```
let rec appendᵒ xs ys xys =
```

Пример: реляционное слияние списков (OCaml/OCanren/miniKanren)

append: α list $\to \alpha$ list $\to \alpha$ list

```
let rec append xs ys =
  match xs with
  | []      → ys
  | h :: tl →
      h :: (append tl ys)
```

append$^o \subseteq \alpha$ list $\times \alpha$ list $\times \alpha$ list

```
let rec append^o xs ys xys =
  ((xs ≡ nil) &&& (xys ≡ ys))
```

Пример: реляционное слияние списков (OCaml/OCanren/miniKanren)

append: α list $\to \alpha$ list $\to \alpha$ list

```
let rec append xs ys =
  match xs with
  | []     → ys
  | h :: tl →
      h :: (append tl ys)
```

append$^o \subseteq \alpha$ list $\times \alpha$ list $\times \alpha$ list

```
let rec appendo xs ys xys =
  ((xs ≡ nil) &&& (xys ≡ ys))
  |||
  (fresh (h t tys)
```

Пример: реляционное слияние списков (OCaml/OCanren/miniKanren)

append: α list $\to \alpha$ list $\to \alpha$ list

```
let rec append xs ys =
  match xs with
  | []     → ys
  | h :: tl →
      h :: (append tl ys)
```

append$^o \subseteq \alpha$ list $\times \alpha$ list $\times \alpha$ list

```
let rec appendo xs ys xys =
  ((xs ≡ nil) &&& (xys ≡ ys))
  |||
  (fresh (h t tys)
     (xs  ≡ h % t)
```

Пример: реляционное слияние списков (OCaml/OCanren/miniKanren)

$\texttt{append}: \alpha\,\texttt{list} \to \alpha\,\texttt{list} \to \alpha\,\texttt{list}$

```
let rec append xs ys =
  match xs with
  | []      → ys
  | h :: tl →
      h :: (append tl ys)
```

$\texttt{append}^o \subseteq \alpha\,\texttt{list} \times \alpha\,\texttt{list} \times \alpha\,\texttt{list}$

```
let rec appendᵒ xs ys xys =
  ((xs ≡ nil) &&& (xys ≡ ys))
  |||
  (fresh (h t tys)
     (xs  ≡ h % t)
     (xys ≡ h % tys)
```

Пример: реляционное слияние списков (OCaml/OCanren/miniKanren)

$\texttt{append}: \alpha\,\texttt{list} \to \alpha\,\texttt{list} \to \alpha\,\texttt{list}$

```
let rec append xs ys =
  match xs with
  | []     → ys
  | h :: tl →
      h :: (append tl ys)
```

$\texttt{append}^o \subseteq \alpha\,\texttt{list} \times \alpha\,\texttt{list} \times \alpha\,\texttt{list}$

```
let rec appendᵒ xs ys xys =
  ((xs ≡ nil) &&& (xys ≡ ys))
  |||
  (fresh (h t tys)
     (xs  ≡ h % t)
     (xys ≡ h % tys)
     (appendᵒ t ys tys) )
```

Пример: реляционное слияние списков (OCaml/OCanren/miniKanren)

`append: α list → α list → α list`

```
let rec append xs ys =
  match xs with
  | []     → ys
  | h :: tl →
      h :: (append tl ys)
```

`append^o ⊆ α list × α list × α list`

```
let rec append^o xs ys xys =
  ((xs ≡ nil) &&& (xys ≡ ys))
  |||
  (fresh (h t tys)
     (xs  ≡ h % t)
     (xys ≡ h % tys)
     (append^o t ys tys) )
```

В оригинальной реализации:

```
(define (append^o xs ys xys)
   (conde
      [(≡ '() xs) (≡ ys xys)]
      [(fresh (h t tys)
         (≡ `(,h . ,t) xs)
         (≡ `(,h . ,tys) xys)
         (append^o t ys tys))]))
```

miniKanren vs. Prologs

- Стратегия поиска
  - DFS быстрее при конечном переборе
  - Чтобы DFS заершался в пролог введлены дополнительные синтаксические конструкции (cuts)
- miniKanren реализован как DSL – встраивается в другие языки.

Цель работы

OCanren – DSL для типобезопасного встраивания miniKanren в OCaml.

Изначальные ожидания

- Меньше “глупых” ошибок
- Сходная производительность, или даже лучше.

Предыдущие типобезопасные встраивания

- HaskellKanren
- ukanren
- miniKanren-ocaml
- Molog
- MiniKanrenT

Предыдущие типобезопасные встраивания

- HaskellKanren
- ukanren
- miniKanren-ocaml
- Molog
- MiniKanrenT

Различия могу быть в следущем:

- Как именно используются типы?
- Как производится унификация?

Как используются типы?

- Один заранее созданный тип, на котором унификация разрешена.
  - ✖ Нет поддержки пользовательских типов.
  - ✔ “Универсальная” функция унификации.

  ukanren, miniKanren-ocaml, HaskellKanren

Как используются типы?

- Один заранее созданный тип, на котором унификация разрешена.
  - ✖ Нет поддержки пользовательских типов.
  - ✔ “Универсальная” функция унификации.

  ukanren, miniKanren-ocaml, HaskellKanren
- О размещении логических переменных беспокоится пользователь.
  - ✖ Неудобно.
  - ✖ Функция унификации для каждлго типа своя.
  - ✔ Поддержка произвольных типов данных.

  miniKanrenT, Molog

Как сделано в OCanren?

- Примитивный тип для представления логических переменных.
- Который используется в пользовательских типах.
- Пользователь должен следовать рекомендациям поп описанию типов.

Как сделано в OCanren?

- Примитивный тип для представления логических переменных.
- Который используется в пользовательских типах.
- Пользователь должен следовать рекомендациям поп описанию типов.
- Одна функция унификации для всех типов.

  ✖ Подход специфичен для OCaml.
  ✖ Написано в типонебезопасном стиле...
  ✔ ... но это скрыто от пользователя.
  ✔ Идеалогически как в первоисточнике.

Промежуточные результаты

Были представлены на ML Workshop 2016 (совмещённым с ICFP 2016)

- Типобезопасное встраивание miniKanren в OCaml.
- Полиморфная унификация.
- Подход для описания типов.

✔ Типы помогают выявить некоторые ошибки.

Промежуточные результаты

Были представлены на ML Workshop 2016 (совмещённым с ICFP 2016)

- Типобезопасное встраивание miniKanren в OCaml.
- Полиморфная унификация.
- Подход для описания типов.

- ✔ Типы помогают выявить некоторые ошибки.
- ✖ Выигрыша в скорости нет.
- ✖ Даже наоборот.

Полиморфная унификация

Работает для всех логических типов $\alpha\, logic$ (он же α^o):

$$\equiv : \Sigma \to \alpha^o \to \alpha^o \to \Sigma_\perp$$

Полиморфная унификация

Работает для всех логических типов $\alpha\, logic$ (он же α^o):

$$\equiv : \Sigma \to \alpha^o \to \alpha^o \to \Sigma_\perp$$

Реализована как сравнение представлений значений в памяти.

Систематическое конструирование логических типов

```
type α logic = Var of int | Value of α
...
```

Систематическое конструирование логических типов

```
type α logic = Var of int | Value of α
...
type (α, β) glist = Nil | Cons of α * β
```

Систематическое конструирование логических типов

```
type α logic = Var of int | Value of α
...
type (α, β) glist = Nil | Cons of α * β

type α list = (α, α list) glist
```

Систематическое конструирование логических типов

```
type α logic = Var of int | Value of α
...
type (α, β) glist = Nil | Cons of α * β

type α list = (α, α list) glist

type α llist = (α, α llist) glist logic
```

Систематическое конструирование логических типов

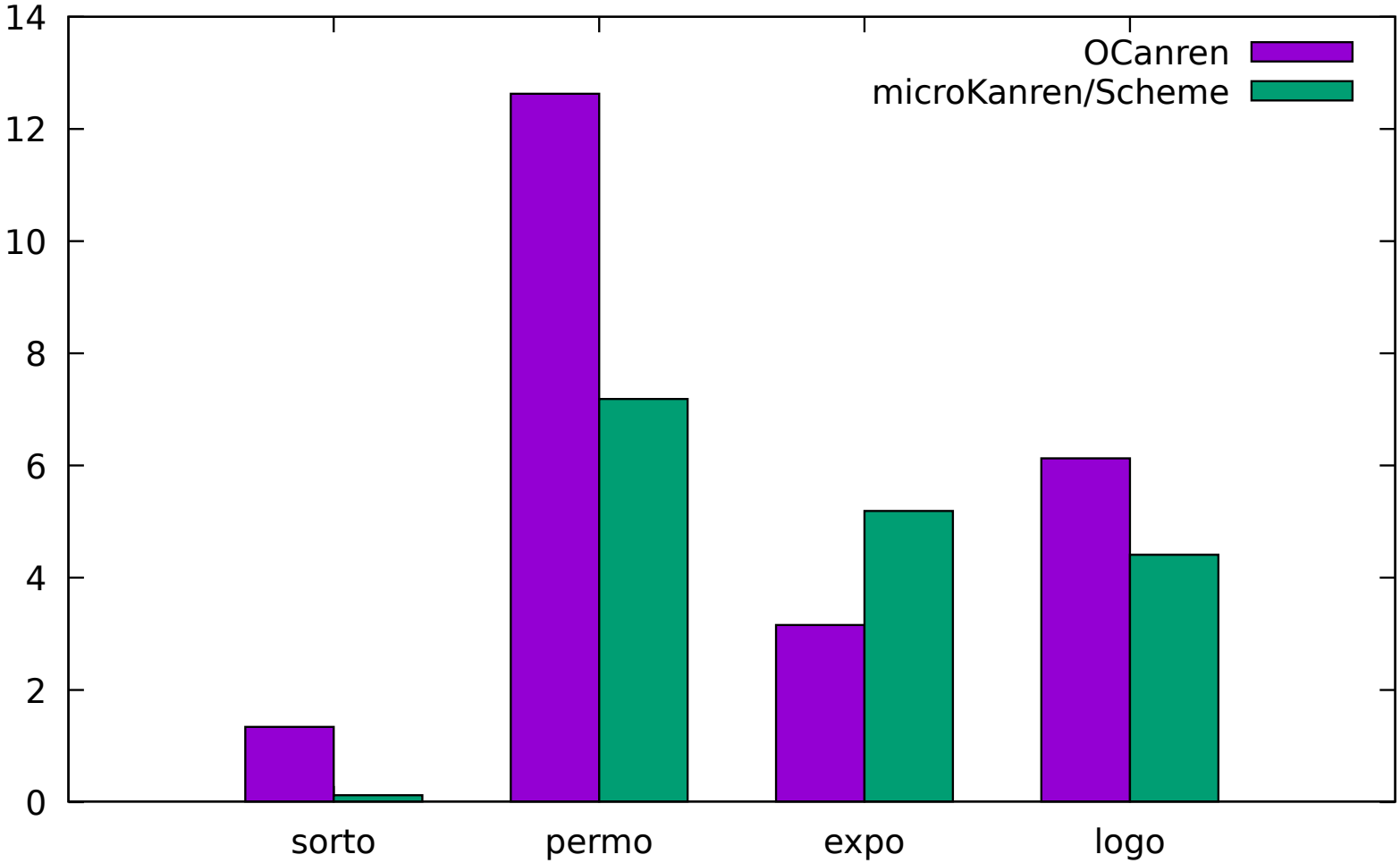
```
type α logic = Var of int | Value of α
...
type (α, β) glist = Nil | Cons of α * β

type α list = (α, α list) glist

type α llist = (α, α llist) glist logic

...
# Value Nil
-: α llist
# Value (Cons (Value 1), Value Nil)
-: int logic llist
# Value (Cons (Var 101), Value Nil)
-: int logic llist
```

Промежуточные результаты

Были представлены на ML Workshop 2016 (совмещённым с ICFP 2016)

- Типобезопасное встраивание miniKanren в OCaml
- Полиморфная унификация
- Регулярный подход для описания типов

Результаты сравнения производительности

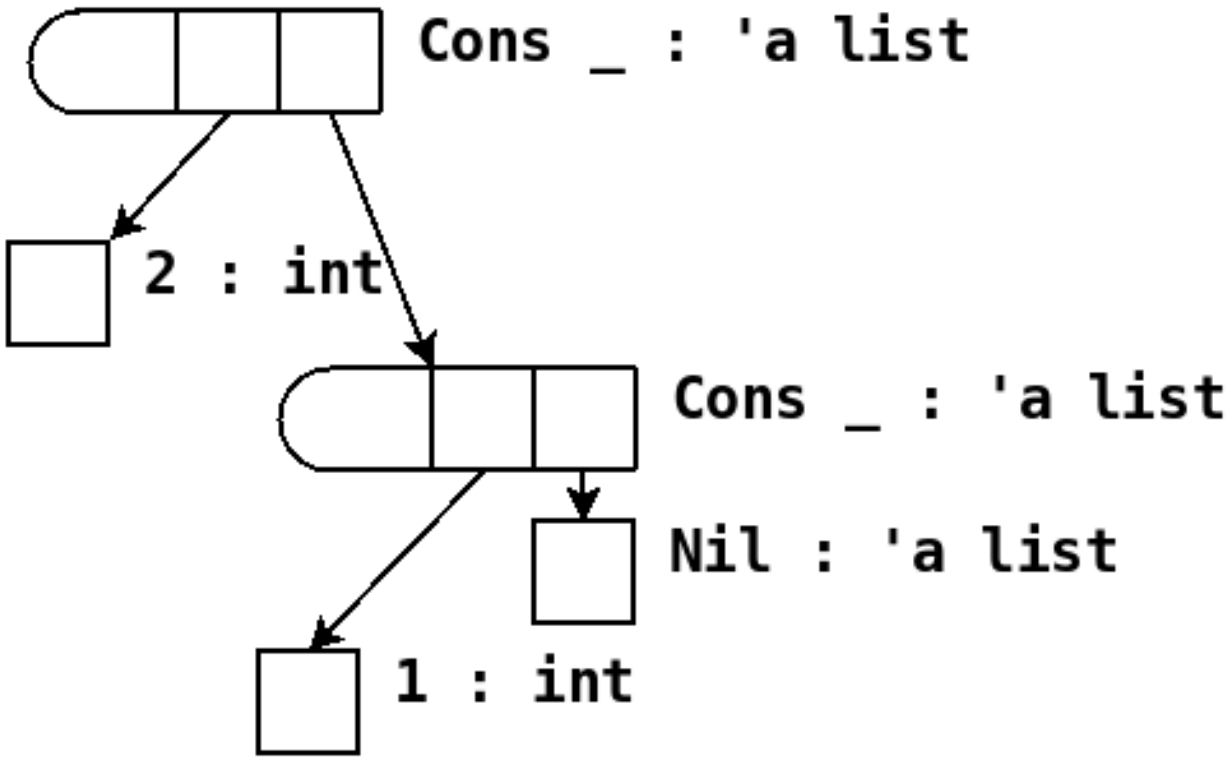


Дальнейшие задачи

- Найти причину замедления
- Ускорить
- Подход должен остаться типобезопасным

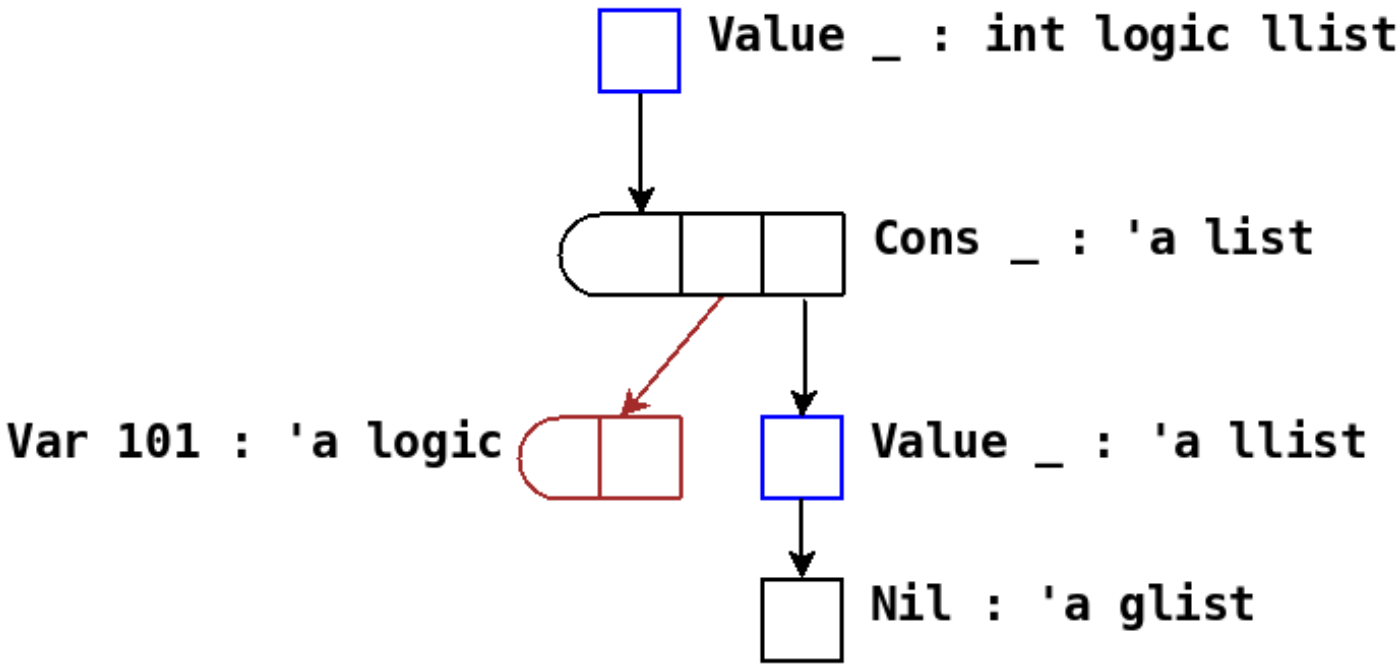
Представление термов

```
Cons (2, Cons (1, Nil)) : int list
```



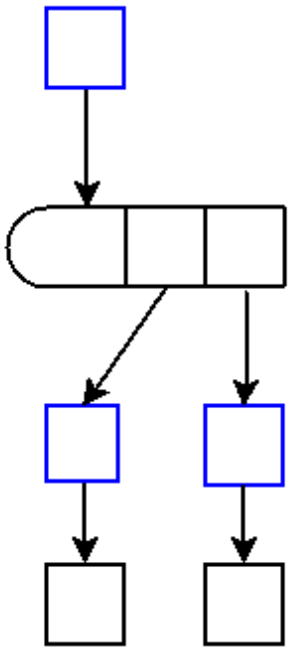
Тегированное представление логических значений

```
Value (Cons (Var 101, Value Nil))
 : int llist
```

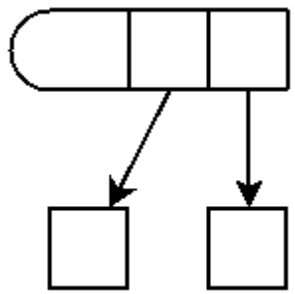


Рост размера термов из-за тегирования

```
Value (Cons (Value 2, Value Nil)) : int llist
```



```
Cons (2, Nil) : int list
```



План улучшения реализации

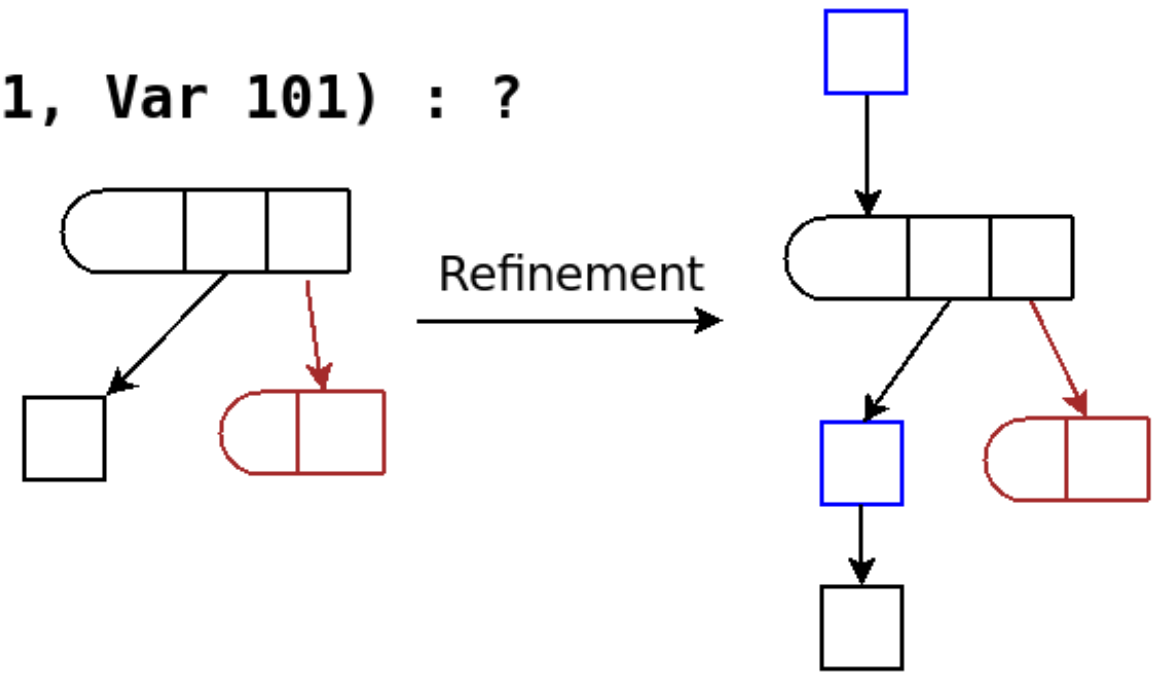
- Новое представление деревьев
  - Значению нельзя присвоить конкретный тип, нужен абстрактный тип значений.
  - Предоставить интерфейс для конструирования логических значений
  - Дополнительные действия по преобразованию абстрактного логического значения в типизируемое
- Модернизировать подход по описанию типов логических значений
- Не потерять типовую безопасность

Основная идея

- Унифицировать нетипизированнные термы
- Преобразовывать к типизируемому представлению при refine
- Запоминать формальные типы значений при каждом преобразовании к логическому значению

```
Value (Cons (Value 1, Var 101)) : int llist
```

```
Cons (1, Var 101) : ?
```



Тип injected

```
type ('a, 'b) injected
```

Тип `'a` – это исходный тип, а тип `'b` – его логическое представление
Представление ground-типов совпадает с представлением `'a`.

Конструирование логических значений для простых типов

```
type ('a, 'b) injected
```

Конструирование логических значений для простых типов

```
type ('a, 'b) injected

val lift: 'a → ('a,'a) injected
val inj : ('a,'b) injected → ('a,'b logic) injected
```

Конструирование логических значений для простых типов

```
type ('a, 'b) injected

val lift: 'a → ('a,'a) injected
val inj : ('a,'b) injected → ('a,'b logic) injected
```

Например для чисел

```
# inj (lift 5)
-: (int, int logic) injected
```

Конструирование логических значений для простых типов

```
type ('a, 'b) injected

val lift: 'a → ('a,'a) injected
val inj : ('a,'b) injected → ('a,'b logic) injected
```

Например для чисел

```
# inj (lift 5)
-: (int, int logic) injected
```

Оба введенных примитива оставляют переданное значение как есть (identity)

Конструирование логических значений для сложных типов

```
module Option = struct
  type α option = None | Some of α
  let fmap = ....
end
```

Конструирование логических значений для сложных типов

```
module Option = struct
  type α option = None | Some of α
  let fmap = ....
end

# Make1(Option).distrib
...
```

Конструирование логических значений для сложных типов

```
module Option = struct
  type α option = None | Some of α
  let fmap = ....
end

# Make1(Option).distrib
...
# let some x  = inj @@ distrib (Some x)
-: (α, β) injected → (α option, β option logic) injected
```

Конструирование логических значений для сложных типов

```
module Option = struct
  type α option = None | Some of α
  let fmap = ....
end

# Make1(Option).distrib
...
# let some x  = inj @@ distrib (Some x)
-: (α, β) injected → (α option, β option logic) injected
```

Здесь fmap нужен для доказательства того, что тип является функтором, т.е. чтобы можно было описать примимитив distrib, который позволяет “снять” тип со значения, ничего не делая со значением (он тоже identity).

Восстановление посчитанных значений

Необходимо, так как значения в типе (_,_) injected хранятся в нетипизированном виде.

```
module Option = struct
  type α option = None | Some of α
  let fmap = ....
end
```

Восстановление посчитанных значений

Необходимо, так как значения в типе (_,_) injected хранятся в нетипизированном виде.

```
module Option = struct
  type α option = None | Some of α
  let fmap = ....
end

  # Make1(Option).reify
  -: ( (α, β) injected → α) → β) →
```

Восстановление посчитанных значений

Необходимо, так как значения в типе (_,_) injected хранятся в нетипизированном виде.

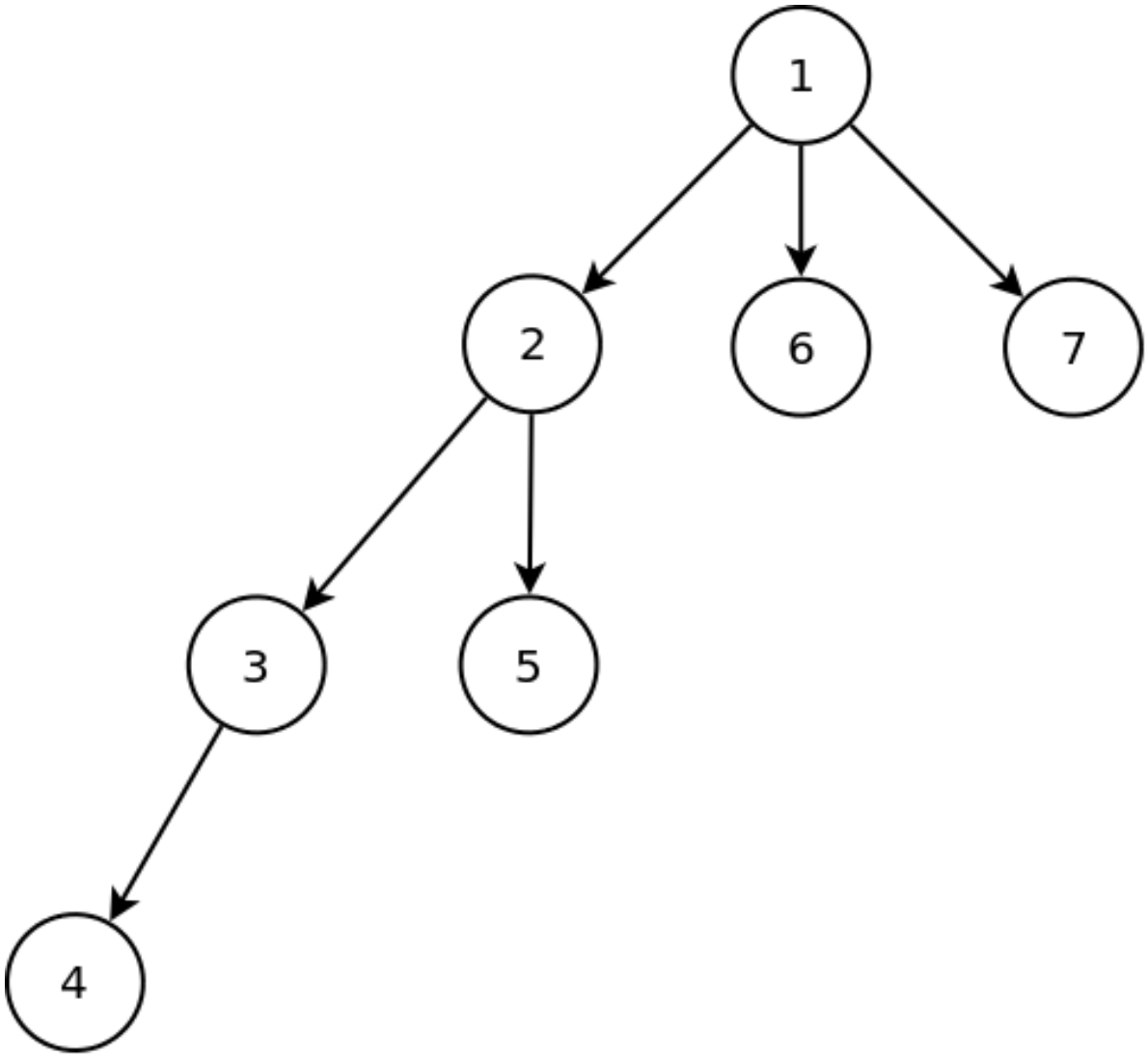
```
module Option = struct
  type α option = None | Some of α
  let fmap = ....
end

# Make1(Option).reify
-: ( (α, β) injected → β) →
   (α option, β option logic) injected → β option logic
```

При построении reify функция fmap используется по существу.

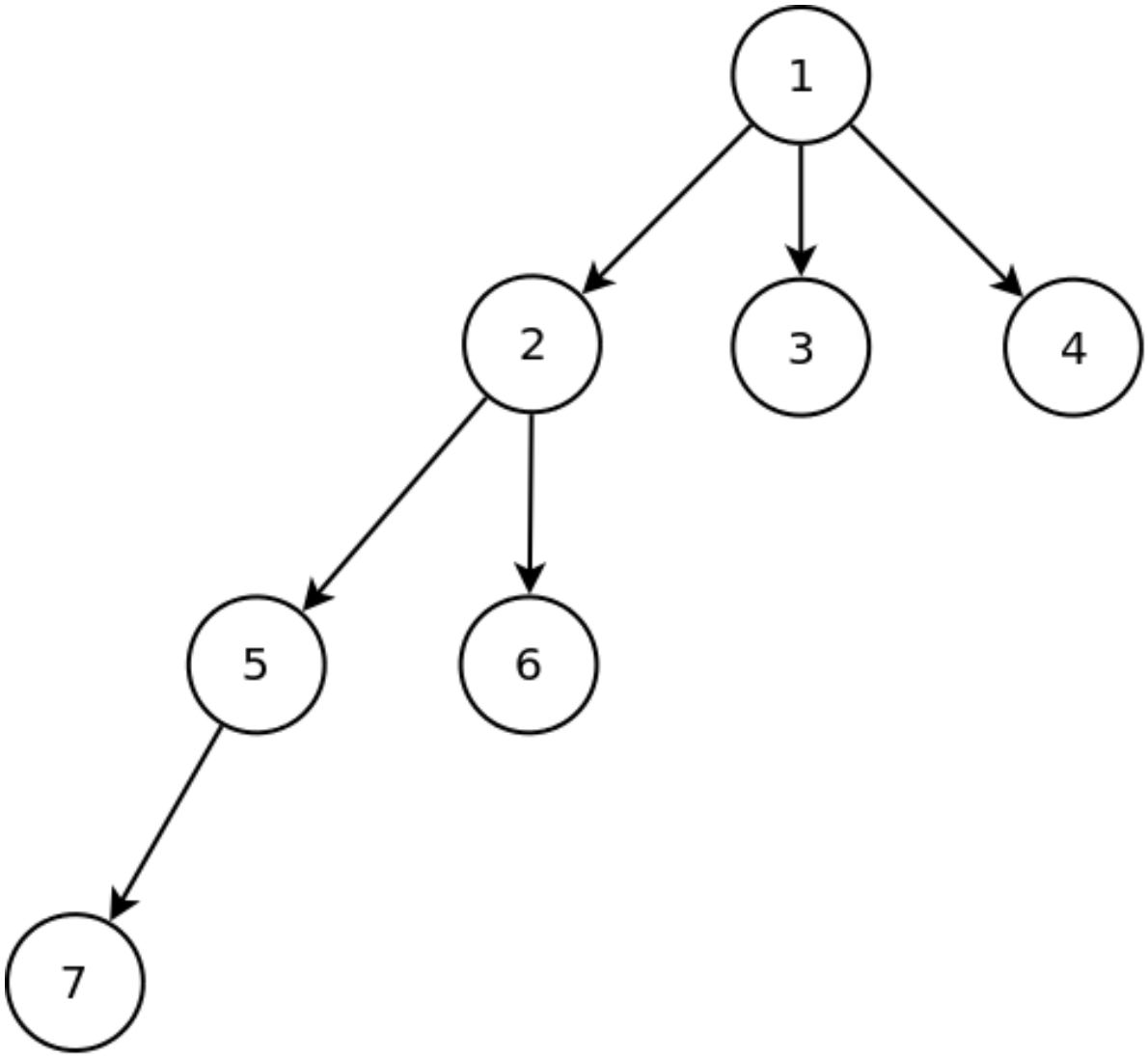
Текущая реализация

- Репозиторий: `https://github.com/dboulytchev/OCanren`
- Реализация μKanren с неравенствами (disequality constraints)
- Работает на большинстве оригинальных примеров
- Быстрее μKanren (`https://github.com/Kakadu/ocanren-perf`)

Поиск в глубину (dfs)



Поиск в ширину (bfs)



Interleaving поиск