Лекция 2.
Задачи типизации $\lambda_{\rightarrow}$.
Выразительная сила $\lambda_{\rightarrow}$.

Основные задачи типизации λ-исчисления

Рассмотрим $? \vdash ? : ?$.

1. *Проверка типа:* выполняется ли $\Gamma \vdash M : \sigma$ для контекста Γ, терма M и типа σ
   Компиляция в языке программирования, типизированном по Чёрчу. Проверка доказательства.
2. *Реконструкция типа:* $? \vdash M : ?$.
   Компиляция в языке программирования, типизированном по Карри. Это бывает чаще, чем кажется.
   ```
   template <class A, class B>
   auto min(A a, B b) -> decltype(a < b ? a : b) {
       return (a < b) ? a : b;
   }
   ```
3. *Обитаемость типа:* $\Gamma \vdash ? : \sigma$.
   Поиск доказательства.

Все задачи разрешимы.

Задача реконструкции типа

Определение

Алгебраический терм

$$\theta ::= x \mid (f\ \theta\ \ldots\ \theta)$$

Определение

Подстановка переменных — функция $S_0 : V \to T$, где $S_0(x) = x$ почти везде (за исключением конечного множества переменных).
Подстановка: $S : T \to T$, что $S(x) = S_0(x)$, но $S(f\ \theta_1\ \ldots\theta_k) = f\ S(\theta_1)\ \ldots\ S(\theta_k)$
$S(\Gamma) = \{x : S(\tau_x) \mid x : \tau_x \in \Gamma\}$

Определение

Будем воспринимать запись типа как некоторое выражение в алгебраических термах, импликация — единственный функциональный символ. Наиболее общей парой для задачи реконструкции типа $? \vdash M :?$ назовём такие $\langle \Gamma, \gamma \rangle$, что:

1. $\Gamma \vdash M : \gamma$
2. *Если $\Delta \vdash M : \delta$, то найдётся такая подстановка S, что $\Delta = S(\Gamma)$ и $\delta = S(\gamma)$.*

Общий план решения

1. Основа решения — алгоритм унификации для системы уравнений в алгебраических термах.
2. По терму M строим систему уравнений в алгебраических термах.
3. Наиболее общим унификатором системы будет является подстановка, из которой можно получить наиболее общую пару.

Система уравнений в алгебраических термах

Определение

Система уравнений в алгебраических термах

$$\begin{cases} \theta_1 = \sigma_1 \\ \vdots \\ \theta_n = \sigma_n \end{cases}$$

где θ_i и σ_i — термы

Задача унификации

Определение

Решением задачи унификации для системы уравнений $\sigma_k = \tau_k$ назовём такую подстановку S, что $S(\sigma_k) = S(\tau_k)$.

Определение

Наиболее общим решением задачи унификации назовём такую подстановку S, что для любого другого решения T найдётся подстановка R, что $T(\rho) = R(S(\rho))$.

Определение

Система в разрешённой форме — каждое уравнение имеет вид $x_i = \theta_i$, причём каждый из x_i входит в систему ровно один раз (является левой частью одного из уравнений)

Определение

Система несовместна — система не имеет решений.

Алгоритм унификации

Пусть дана система уравнений $\sigma_i = \tau_i$. Возьмём произвольное уравнение и попробуем проверить/применить одно из следующих условий/действий к нему:

(a) $\sigma_i = x$ если σ_i не переменная перепишем как $x = \sigma_i$

(b) $\sigma_i = \sigma_i$ удалим

(c) $f\ \theta_1 \dots \theta_n = f\ \rho_1 \dots \rho_n$ заменим на n уравнений $\theta_k = \rho_k$

(d) если уравнение имеет вид $x = \tau_i$ и x входит хотя бы в одно другое уравнение, то заменим все другие уравнения на $\sigma_k[x := \tau_i] = \tau_k[x := \tau_i]$

(e) если уравнение имеет вид $x = f\ \dots x_i \dots$, система несовместна (occurrs check)

(f) если уравнение имеет вид f ... $= g$ ... при $f \neq g$, система несовместна.

Если нет ни одного подходящего правила ни для одного уравнения — закончим работу (система находится в разрешённой форме).

Алгоритм всегда завершает работу

- Рассмотрим $\langle x, y, z\rangle$, где:
  - x — количество переменных, входящих в систему, которые входят в левую часть некоторого уравнения и при этом имеют хотя бы ещё одно вхождение в систему.
  - y — количество функциональных символов в системе,
  - z — количество уравнений типа $a = a$ и $\theta = b$, где θ не переменная.
- Упорядочим тройки лексикографически (согласно порядковому типу ω^3).
- Заметим, что операции (a) и (b) всегда уменьшают z и иногда уменьшают x. Операция (c) всегда уменьшает y, иногда x и, возможно, увеличивает z. Операция (d) всегда уменьшает x и иногда увеличивает y. То есть, операции $(a) - (d)$ всегда уменьшают соответствующий ординал.
- Согласно лемме из матлога любая строго убывающая последовательность ординалов имеет конечную длину.

Корректность алгоритма

Теорема

Для системы уравнений $\sigma_k = \tau_k$ алгоритм даёт наиболее общее решение, если оно существует.

Доказательство.

- Операции $(a) - (d)$ не меняют множества решений системы. За конечное время либо выполнится условие (e) или (f), либо будут исчерпаны правила.
- Условия (e), (f) очевидно означают несовместность системы (в т.ч. исходной).
- При отсутствии возможности применения правил и условий все уравнения имеют вид $x = \theta_x$, где x входит в систему только один раз. Построим $S_0(x) = \theta_x$.
- Если есть подстановка $T : T(\sigma_k) = T(\tau_k)$, тогда положим $R = \mathcal{U}(\{S_0(x) = T_0(x) \mid x \neq T_0(x)\})$. Очевидно, $T(\zeta) = R(S(\zeta))$

$\square$

Построение системы по терму M

Будем строить систему рекурсией по структуре терма M (предполагаем, что все имена для связанных переменных уникальны). Каждой переменной x сопоставим свежую типовую переменную α_x. Также каждой аппликации $P\ Q$ в терме сопоставим свежую типовую переменную β_{PQ}.
По терму M и по всем его подтермам рекурсивно построим пару $\langle \mathcal{E}_M, \sigma_M \rangle$ так:

$$\langle \mathcal{E}_M, \sigma_M \rangle := \begin{cases} \langle \varnothing, \alpha_x \rangle, & M = x \\ \langle \mathcal{E}_P, \alpha_x \to \sigma_P \rangle, & M = \lambda x.P \\ \langle \mathcal{E}_P \cup \mathcal{E}_Q \cup \{\sigma_P = \sigma_Q \to \beta_{PQ}\}, \beta_{PQ} \rangle, & M = P\ Q \end{cases}$$

Теорема

Если $S = \mathcal{U}(\mathcal{E}_M)$, то наиболее общим решением задачи типизации будет $\langle \{x : S(\alpha_x) \mid x \in FV(M)\}, S(\sigma_M) \rangle$

Доказательство.

Индукция по структуре M. □

Пример вывода типов

1. Выберем пример ($M = \lambda f.\lambda x.f\ (f\ x)$) и индуктивно составим систему:
    - Для $f\ x$: $\langle\{\alpha_f = \alpha_x \to \beta_{fx}\},\ \beta_{fx}\rangle$
    - Для $f\ (f\ x)$: $\langle\{\alpha_f = \alpha_x \to \beta_{fx}, \alpha_f = \beta_{fx} \to \beta_{ffx}\}, \beta_{ffx}\rangle$
    - Для $\lambda x.f\ (f\ x)$: $\langle\{\alpha_f = \alpha_x \to \beta_{fx}, \alpha_f = \beta_{fx} \to \beta_{ffx}\}, \alpha_x \to \beta_{ffx}\rangle$
    - Для $\lambda f.\lambda x.f\ (f\ x)$: $\langle\{\alpha_f = \alpha_x \to \beta_{fx}, \alpha_f = \beta_{fx} \to \beta_{ffx}\}, \alpha_f \to \alpha_x \to \beta_{ffx}\rangle$
2. Приводим систему к разрешённой форме:
    - $\alpha_f = \alpha_x \to \beta_{fx}, \alpha_f = \beta_{fx} \to \beta_{ffx}$
    - $\alpha_f = \alpha_x \to \beta_{fx}, \alpha_x \to \beta_{fx} = \beta_{fx} \to \beta_{ffx}$, правило (d)
    - $\alpha_f = \alpha_x \to \beta_{fx}, \alpha_x = \beta_{fx}, \beta_{fx} = \beta_{ffx}$, правило (c)
    - $\alpha_f = \beta_{fx} \to \beta_{fx}, \alpha_x = \beta_{fx}, \beta_{fx} = \beta_{ffx}$, правило (d)
    - $\alpha_f = \beta_{ffx} \to \beta_{ffx}, \alpha_x = \beta_{ffx}, \beta_{fx} = \beta_{ffx}$, правило (d)
3. Строим функцию подстановки: $S_0(\alpha_f) = \beta_{ffx} \to \beta_{ffx}, S_0(\alpha_x) = S_0(\beta_{fx}) = \beta_{ffx}$
4. Наиболее общая пара: $\langle\varnothing, S(\alpha_f \to \alpha_x \to \beta_{ffx})\rangle$, то есть

$$\vdash \lambda f.\lambda x.f\ (f\ x) : (\beta_{ffx} \to \beta_{ffx}) \to \beta_{ffx} \to \beta_{ffx}$$

Проверка типа

1. Задача реконструкции типа находит наиболее общую типизацию.
2. Сведём задачу проверки $\Gamma \vdash M : \sigma$ к задаче реконструкции типа $? \vdash M :?$ и найдём $\langle \Gamma', \sigma' \rangle$.
3. Проверим, является ли $\langle \Gamma, \sigma \rangle$ частным случаем $\langle \Gamma', \sigma' \rangle$.

Обитаемость типа

1. Задача поиска M, что $\Gamma \vdash M : \sigma$.
2. Эквивалентно поиску доказательства утверждения σ в ИИП (разрешимо).
3. По доказательству затем получим его краткую запись в виде терма.

Выразительная сила

Определение

Расширенный полином, где $P(x)$, $P(x, y)$ — полиномы (выражения, составленные из сложения, умножения, аргументов и натуральных констант), c — константа:

$$E(m, n) := \begin{cases} c, & m = 0, n = 0 \\ P_1(m), & n = 0 \\ P_2(n), & m = 0 \\ P_3(m, n), & m > 0, n > 0 \end{cases}$$

Теорема

Пусть $\eta = (\alpha \to \alpha) \to (\alpha \to \alpha)$. Если $F : \eta \to \eta \to \eta$, то найдётся такой расширенный полином $E(m, n)$, что при всех $m, n \in \mathbb{N}_0$ выполнено $F\ \overline{m}\ \overline{n} =_\beta \overline{E(m, n)}$, либо $F\ \overline{m}\ \overline{n} =_\beta \lambda f.f$ при $E(m, n) = 1$.

Расширение языка: полное ИИВ

- Попробуем увеличить выразительную силу, воспользовавшись изоморфизмом Карри-Ховарда. Рассмотрим полное ИИВ.
- Расширим язык:

$$
\begin{array}{rcll}
\Lambda & ::= & x \mid (\Lambda\ \Lambda) \mid (\lambda x.\Lambda) & \\
& \mid & \langle \Lambda, \Lambda \rangle \mid (\pi_L\ \Lambda) \mid (\pi_R\ \Lambda) & \text{термы для } \& \\
& \mid & (In_L\ \Lambda) \mid (In_R\ \Lambda) \mid (Case\ \Lambda\ \Lambda\ \Lambda) & \text{термы для } \vee \\
& \mid & (Absurd\ \Lambda) & \text{термы для } \perp
\end{array}
$$

Новые связки требуют отдельных правил

- Упорядоченная пара в бестиповом лямбда-исчислении.

$$\text{MkPair} ::= \lambda a.\lambda b.\underbrace{(\lambda p.p\ a\ b)}_{\text{MkPair a b}} \qquad \text{Fst} ::= \lambda p.p\ \text{T} \qquad \text{Snd} ::= \lambda p.p\ \text{F}$$

- Какой тип у MkPair a b?

$$\text{MkPair a b} = \lambda p^{\alpha\to\beta\to\gamma}.p\ a^{\alpha}\ b^{\beta} : (\alpha \to \beta \to \gamma) \to \gamma$$

- Тип зависит от типа результата γ: при левой проекции $\alpha = \gamma$

$$\text{Fst} = \lambda p.p^{(\alpha\to\beta\to\gamma)\to\gamma}\ \text{T}^{\alpha\to\beta\to\alpha} : \gamma$$

  При правой проекции $\beta = \gamma$: $\text{Snd} = \lambda p.p^{(\alpha\to\beta\to\gamma)\to\gamma}\ \text{F}^{\alpha\to\beta\to\beta} : \gamma$

- Как известно, связки в ИИВ друг через друга не выражаются. Поэтому никакая формула не сможет типизировать упорядоченную пару. Однако, в данном варианте типизации может помочь квантор по γ или схема аксиом (правил вывода).

Дополнительные правила для расширенного языка

1. Типизация дизъюнкции (алгебраического типа)

$$\frac{\Gamma \vdash A : \varphi}{\Gamma \vdash In_L\ A : \varphi \vee \psi} \qquad \frac{\Gamma \vdash B : \psi}{\Gamma \vdash In_R\ B : \varphi \vee \psi}$$

$$\frac{\Gamma \vdash L : \varphi \vee \psi, \quad \Gamma \vdash f : \varphi \to \tau, \quad \Gamma \vdash g : \psi \to \tau}{\Gamma \vdash \text{Case}\ L\ f\ g : \tau}$$

2. Типизация конъюнкции (упорядоченной пары)

$$\frac{\Gamma \vdash A : \varphi \qquad \Gamma \vdash B : \psi}{\Gamma \vdash \langle A, B \rangle : \varphi \& \psi} \qquad \frac{\Gamma \vdash P : \varphi \& \psi}{\Gamma \vdash \text{Fst}\ P : \varphi} \qquad \frac{\Gamma \vdash P : \varphi \& \psi}{\Gamma \vdash \text{Snd}\ P : \psi}$$

3. Типизация лжи

$$\frac{\Gamma \vdash A : \perp}{\Gamma \vdash \text{Absurd}\ A : \varphi}$$