

История лямбда-исчисления

- ▶ Фреге, 1893. Все функции — одноместные. Сложение: $a + b = (+_a)(b)$, одноместная функция, возвращающая другую одноместную функцию: $(+_5)(4) = 9$, $(+_5)((+_3)7) = 15$
- ▶ Анонимные функции. Что такое, например, возведение в квадрат?
 - ▶ Возведение в квадрат чего? $f(x) = x^2$.
 - ▶ А зачем тут f и почему x ?
 - ▶ Давайте напишем это как-то так: \hat{x}^2 (Principia Mathematica, 1910)
 - ▶ От имени толк бывает: в Фортране переменные $I..N$ — целые, остальные — плавающие.
- ▶ Алонзо Чёрч, 1930+ — попытка построить исчисление для матлогики
Последовательное превращение записи: $\wedge x.x^2$, $\lambda x.x^2$. Точка — тоже из Principia Mathematica: $(\exists a).\varphi(a)$.
- ▶ Тезис Чёрча сформулирован впервые про лямбда-исчисление
- ▶ 1936 — лямбда-исчисление в современном варианте (для программирования)
- ▶ 1940 — просто-типизированное лямбда-исчисление

Лямбда-исчисление, синтаксис

$$\Lambda ::= (\lambda x. \Lambda) | (\Lambda \ \Lambda) | x$$

Мета-язык:

- ▶ Мета-переменные:
 - ▶ $A \dots Z$ — мета-переменные для термов.
 - ▶ x, y, z — мета-переменные для переменных.
- ▶ Правила расстановки скобок аналогичны правилам для кванторов:
 - ▶ Лямбда-выражение ест всё до конца строки
 - ▶ Аппликация левоассоциативна

Пример

- ▶ $a \ b \ c \ (\lambda d. e \ f \ \lambda g. h) \ i \equiv \left(\left((a \ b) \ c \right) \left(\lambda d. ((e \ f) (\lambda g. h)) \right) \right) i$
- ▶ $0 := \lambda f. \lambda x. x; \quad (+1) := \lambda n. \lambda f. \lambda x. n \ f \ (f \ x); \quad (+2) := \lambda x. (+1) \ ((+1) \ x)$

Альфа-эквивалентность

$$FV(A) = \begin{cases} \{x\}, & A \equiv x \\ FV(P) \cup FV(Q), & A \equiv P Q \\ FV(P) \setminus \{x\}, & A \equiv \lambda x.P \end{cases}$$

Примеры:

- ▶ $M := \lambda b. \lambda c. a \ c \ (b \ c); FV(M) = \{a\}$
- ▶ $N := x \ (\lambda x. (x \ (\lambda y. x))); FV(N) = \{x\}$

Определение

$A =_{\alpha} B$, если и только если выполнено одно из трёх:

1. $A \equiv x, B \equiv y, x \equiv y$;
2. $A \equiv P_a Q_a, B \equiv P_b Q_b$ и $P_a =_{\alpha} P_b, Q_a =_{\alpha} Q_b$;
3. $A \equiv (\lambda x. P), B \equiv (\lambda y. Q), P[x := t] =_{\alpha} Q[y := t]$, где t не входит в A и B .

Определение

$$L = \Lambda /_{=_{\alpha}}$$

Альфа-эквивалентность, пример

1. $A \equiv x, B \equiv y, x \equiv y$;
2. $A \equiv P_a Q_a, B \equiv P_b Q_b$ и $P_a =_\alpha P_b, Q_a =_\alpha Q_b$;
3. $A \equiv (\lambda x.P), B \equiv (\lambda y.Q), P[x := t] =_\alpha Q[y := t]$, где t не входит в A и B .

Лемма

$$\lambda a. \lambda b. a \ b =_\alpha \lambda b. \lambda a. b \ a$$

Доказательство.

t	$=_\alpha$	t	Правило 1
s	$=_\alpha$	s	Правило 1
$t \ s$	$=_\alpha$	$t \ s$	Правило 2
$\lambda b. (t \ b)$	$=_\alpha$	$\lambda a. (t \ a)$	Правило 3
$\lambda a. \lambda b. (a \ b)$	$=_\alpha$	$\lambda b. \lambda a. (b \ a)$	Правило 3



Бета-редукция

Интуиция: вызов функции.

λ -выражение	Python
$\lambda f.\lambda x.f\ x$	<code>def one(f,x): return f(x)</code>
$(\lambda x.x\ x)\ (\lambda x.x\ x)$	<code>(lambda x: x x) (lambda x: x x)</code>
	<code>def omega(x): return x(x); omega(omega)</code>

Бета-редукция

Интуиция: вызов функции.

λ -выражение	Python
$\lambda f.\lambda x.f\ x$	<code>def one(f,x): return f(x)</code>
$(\lambda x.x\ x)\ (\lambda x.x\ x)$	<code>(lambda x: x x) (lambda x: x x)</code>
	<code>def omega(x): return x(x); omega(omega)</code>

Определение

Терм вида $(\lambda x.P)\ Q$ — бета-редекс.

Определение

$A \rightarrow_\beta B$, если:

1. $A \equiv (\lambda x.P)\ Q$, $B \equiv P\ [x := Q]$, при условии свободы для подстановки;
2. $A \equiv (P\ Q)$, $B \equiv (P'\ Q')$, при этом $P \rightarrow_\beta P'$ и $Q = Q'$, либо $P = P'$ и $Q \rightarrow_\beta Q'$;
3. $A \equiv (\lambda x.P)$, $B \equiv (\lambda x.P')$, и $P \rightarrow_\beta P'$.

Бета-редукция, пример

Пример

$$(\lambda x. x \ x) (\lambda n. n) \rightarrow_{\beta} (\lambda n. n) (\lambda n. n) \rightarrow_{\beta} \lambda n. n$$

Пример

$$(\lambda x. x \ x) (\lambda x. x \ x) \rightarrow_{\beta} (\lambda x. x \ x) (\lambda x. x \ x)$$

Нормальная форма

Определение

Лямбда-терм N находится в нормальной форме, если нет $Q: N \rightarrow_{\beta} Q$.

Пример

В нормальной форме:

$\lambda f. \lambda x. x (f (f \lambda g. x))$

Нормальная форма

Определение

Лямбда-терм N находится в нормальной форме, если нет $Q: N \rightarrow_{\beta} Q$.

Пример

В нормальной форме:

$\lambda f. \lambda x. x (f (f \lambda g. x))$

Пример

Не в нормальной форме (редексы подчёркнуты):

$\lambda f. \lambda x. (\lambda g. x) (f (f x))$
 $((\lambda x. x) (\lambda x. x))$ $((\lambda x. x) (\lambda x. x))$

Определение

(\rightarrow_{β}) — транзитивное и рефлексивное замыкание (\rightarrow_{β}) .

Булевские значения

$T := \lambda x. \lambda y. x$ $F := \lambda x. \lambda y. y$

Тогда: $Or := \lambda a. \lambda b. a \ T \ b$:

$$\begin{aligned} Or \ F \ T &= ((\lambda a. \lambda b. a \ T \ b) \ F) \ T \rightarrow_{\beta} (\lambda b. F \ T \ b) \ T \rightarrow_{\beta} F \ T \ T = \\ &= (\lambda x. \lambda y. y) \ T \ T \rightarrow_{\beta} (\lambda y. y) \ T \rightarrow_{\beta} T \end{aligned}$$

Чёрчевские нумералы

$$f^{(n)}(x) = \begin{cases} x, & n = 0 \\ f(f^{(n-1)}(x)), & n > 0 \end{cases}$$

Определение

Чёрчевский нумерал $\bar{n} = \lambda f. \lambda x. f^{(n)}(x)$

Пример

$$\bar{3} = \lambda f. \lambda x. f(f(f(x)))$$

Инкремент: $Inc = \lambda n. \lambda f. \lambda x. n \ f \ (f \ x)$

$$(\lambda n. \lambda f. \lambda x. n \ f \ (f \ x)) \ \bar{0} = (\lambda n. \lambda f. \lambda x. n \ f \ (f \ x)) \ (\lambda f'. \lambda x'. x') \rightarrow_{\beta}$$

Чёрчевские нумералы

$$f^{(n)}(x) = \begin{cases} x, & n = 0 \\ f(f^{(n-1)}(x)), & n > 0 \end{cases}$$

Определение

Чёрчевский нумерал $\bar{n} = \lambda f. \lambda x. f^{(n)}(x)$

Пример

$$\bar{3} = \lambda f. \lambda x. f(f(f(x)))$$

Инкремент: $Inc = \lambda n. \lambda f. \lambda x. n \ f \ (f \ x)$

$$\begin{aligned} (\lambda n. \lambda f. \lambda x. n \ f \ (f \ x)) \ \bar{0} &= (\lambda n. \lambda f. \lambda x. n \ f \ (f \ x)) \ (\lambda f'. \lambda x'. x') \rightarrow_{\beta} \\ \dots \lambda f. \lambda x. (\lambda f'. \lambda x'. x') \ f \ (f \ x) &\rightarrow_{\beta} \end{aligned}$$

Чёрчевские нумералы

$$f^{(n)}(x) = \begin{cases} x, & n = 0 \\ f(f^{(n-1)}(x)), & n > 0 \end{cases}$$

Определение

Чёрчевский нумерал $\bar{n} = \lambda f. \lambda x. f^{(n)}(x)$

Пример

$$\bar{3} = \lambda f. \lambda x. f(f(f(x)))$$

Инкремент: $Inc = \lambda n. \lambda f. \lambda x. n \ f \ (f \ x)$

$$\begin{aligned} (\lambda n. \lambda f. \lambda x. n \ f \ (f \ x)) \ \bar{0} &= (\lambda n. \lambda f. \lambda x. n \ f \ (f \ x)) \ (\lambda f'. \lambda x'. x') \rightarrow_{\beta} \\ \dots \lambda f. \lambda x. (\lambda f'. \lambda x'. x') \ f \ (f \ x) &\rightarrow_{\beta} \\ \dots \lambda f. \lambda x. (\lambda x'. x') \ (f \ x) &\rightarrow_{\beta} \end{aligned}$$

Чёрчевские нумералы

$$f^{(n)}(x) = \begin{cases} x, & n = 0 \\ f(f^{(n-1)}(x)), & n > 0 \end{cases}$$

Определение

Чёрчевский нумерал $\bar{n} = \lambda f. \lambda x. f^{(n)}(x)$

Пример

$$\bar{3} = \lambda f. \lambda x. f(f(f(x)))$$

Инкремент: $Inc = \lambda n. \lambda f. \lambda x. n \ f \ (f \ x)$

$$\begin{aligned} (\lambda n. \lambda f. \lambda x. n \ f \ (f \ x)) \ \bar{0} &= (\lambda n. \lambda f. \lambda x. n \ f \ (f \ x)) \ (\lambda f'. \lambda x'. x') \rightarrow_{\beta} \\ \dots \lambda f. \lambda x. (\lambda f'. \lambda x'. x') \ f \ (f \ x) &\rightarrow_{\beta} \\ \dots \lambda f. \lambda x. (\lambda x'. x') \ (f \ x) &\rightarrow_{\beta} \\ \dots \lambda f. \lambda x. f \ x &= \bar{1} \end{aligned}$$

Чёрчевские нумералы

$$f^{(n)}(x) = \begin{cases} x, & n = 0 \\ f(f^{(n-1)}(x)), & n > 0 \end{cases}$$

Определение

Чёрчевский нумерал $\bar{n} = \lambda f. \lambda x. f^{(n)}(x)$

Пример

$$\bar{3} = \lambda f. \lambda x. f(f(f(x)))$$

Инкремент: $Inc = \lambda n. \lambda f. \lambda x. n \ f \ (f \ x)$

$$\begin{aligned} (\lambda n. \lambda f. \lambda x. n \ f \ (f \ x)) \ \bar{0} &= (\lambda n. \lambda f. \lambda x. n \ f \ (f \ x)) \ (\lambda f'. \lambda x'. x') \rightarrow_{\beta} \\ \dots \lambda f. \lambda x. (\lambda f'. \lambda x'. x') \ f \ (f \ x) &\rightarrow_{\beta} \\ \dots \lambda f. \lambda x. (\lambda x'. x') \ (f \ x) &\rightarrow_{\beta} \\ \dots \lambda f. \lambda x. f \ x &= \bar{1} \end{aligned}$$

Декремент: $Dec = \lambda n. \lambda f. \lambda x. n \ (\lambda g. \lambda h. h \ (g \ f)) \ (\lambda u. x) \ (\lambda u. u)$

Упорядоченная пара и алгебраический тип

Определение

$Pair(a, b) := \lambda s.s \ a \ b$

$Fst := \lambda p.p \ T$

$Snd := \lambda p.p \ F$

Пример

$Fst(Pair(a, b)) = (\lambda p.p \ T) \ \lambda s.s \ a \ b \twoheadrightarrow_{\beta} (\lambda s.s \ a \ b) \ T \twoheadrightarrow_{\beta} a$

Определение

$InL \ L := \lambda p.\lambda q.p \ L$

$InR \ R := \lambda p.\lambda q.q \ R$

$Case \ t \ f \ g := t \ f \ g$

Теорема Чёрча-Россера

Теорема (Чёрча-Россера)

Для любых термов N, P, Q , если $N \twoheadrightarrow_{\beta} P$, $N \twoheadrightarrow_{\beta} Q$, и $P \neq Q$, то найдётся T : $P \twoheadrightarrow_{\beta} T$ и $Q \twoheadrightarrow_{\beta} T$.

Теорема

Если у терма N существует нормальная форма, то она единственна

Доказательство.

Пусть не так и $N \twoheadrightarrow_{\beta} P$ вместе с $N \twoheadrightarrow_{\beta} Q$, $P \neq Q$. Тогда по теореме Чёрча-Россера существует T : $P \twoheadrightarrow_{\beta} T$ и $Q \twoheadrightarrow_{\beta} T$, причём $T \neq P$ или $T \neq Q$ в силу транзитивности ($\twoheadrightarrow_{\beta}$) □

Бета-эквивалентность, неподвижная точка

Пример

$\Omega = (\lambda x. x \ x) (\lambda x. x \ x)$ не имеет нормальной формы: $\Omega \rightarrow_\beta \Omega$

Определение

$(=_\beta)$ — транзитивное, рефлексивное и симметричное замыкание (\rightarrow_β) .

Теорема

Для любого терма N найдётся такой терм R , что $R =_\beta N \ R$.

Доказательство.

Пусть $Y = \lambda f. (\lambda x. f \ (x \ x)) (\lambda x. f \ (x \ x))$. Тогда $R := Y \ N$:

$$Y \ N =_\beta (\lambda x. N \ (\textcolor{red}{x} \ \textcolor{blue}{x})) (\lambda x. N \ (x \ x)) =_\beta N \ ((\lambda x. \textcolor{red}{N} \ (\textcolor{red}{x} \ \textcolor{red}{x})) (\lambda x. \textcolor{blue}{N} \ (\textcolor{blue}{x} \ \textcolor{blue}{x})))$$



Интуиционистское И.В. (натуральный, естественный вывод)

- ▶ Формулы языка (секвенции) имеют вид: $\Gamma \vdash \alpha$. Правила вывода:
- ▶ Аксиома:
$$\frac{\text{посылка 1} \quad \text{посылка 2} \quad \dots}{\text{заключение}} \quad (\text{аннотация})$$
$$\frac{}{\Gamma, \alpha \vdash \alpha} \quad (\text{акс.})$$
- ▶ Правила введения связок:
$$\frac{\Gamma, \alpha \vdash \beta}{\Gamma \vdash \alpha \rightarrow \beta} \quad \frac{\Gamma \vdash \alpha \quad \Gamma \vdash \beta}{\Gamma \vdash \alpha \vee \beta}, \quad \frac{\Gamma \vdash \beta}{\Gamma \vdash \alpha \vee \beta} \quad \frac{\Gamma \vdash \alpha \quad \Gamma \vdash \beta}{\Gamma \vdash \alpha \& \beta}$$
- ▶ Правила удаления связок:
$$\frac{\Gamma \vdash \alpha \quad \Gamma \vdash \alpha \rightarrow \beta}{\Gamma \vdash \beta} \quad \frac{\Gamma \vdash \alpha \rightarrow \gamma \quad \Gamma \vdash \beta \rightarrow \gamma \quad \Gamma \vdash \alpha \vee \beta}{\Gamma \vdash \gamma}$$
$$\frac{\Gamma \vdash \alpha \& \beta}{\Gamma \vdash \alpha} \quad \frac{\Gamma \vdash \alpha \& \beta}{\Gamma \vdash \beta} \quad \frac{\Gamma \vdash \perp}{\Gamma \vdash \alpha}$$
- ▶ Пример доказательства:
$$\frac{\frac{\frac{A \& B \vdash A \& B}{A \& B \vdash B} \quad (\text{акс.}) \quad (\text{удал}\&)}{\frac{A \& B \vdash A \& B}{A \& B \vdash A} \quad (\text{акс.}) \quad (\text{удал}\&)} \quad (\text{введ}\&)}{A \& B \vdash B \& A}$$

Эквивалентность натурального и гильбертовского выводов

Определение

$$|\alpha|_{\perp} = \begin{cases} X, & \alpha \equiv X \\ |\sigma|_{\perp} \star |\tau|_{\perp}, & \alpha \equiv \sigma \star \tau \\ |\sigma|_{\perp} \rightarrow \perp, & \alpha \equiv \neg \sigma \end{cases} \quad |\alpha|_{\neg} = \begin{cases} X, & \alpha \equiv X \\ |\sigma|_{\neg} \star |\tau|_{\neg}, & \alpha \equiv \sigma \star \tau \\ A \& \neg A, & \alpha \equiv \perp \end{cases}$$

Теорема

1. $\Gamma \vdash_n \alpha$ тогда и только тогда, когда $|\Gamma|_{\neg} \vdash_h |\alpha|_{\neg}$.
2. $\Gamma \vdash_h \alpha$ тогда и только тогда, когда $|\Gamma|_{\perp} \vdash_n |\alpha|_{\perp}$.

Доказательство.

Индукция по структуре



Просто-типизированное лямбда-исчисление

Определение

Импликационный фрагмент интуиционистской логики:

$$\frac{}{\Gamma, \varphi \vdash_{\rightarrow} \varphi} \quad \frac{\Gamma, \varphi \vdash_{\rightarrow} \psi}{\Gamma \vdash_{\rightarrow} \varphi \rightarrow \psi} \quad \frac{\Gamma \vdash_{\rightarrow} \varphi \quad \Gamma \vdash_{\rightarrow} \varphi \rightarrow \psi}{\Gamma \vdash_{\rightarrow} \psi}$$

Теорема

Если $\Gamma \vdash \alpha$, то $\Gamma \vdash_{\rightarrow} \alpha$.

Доказательство.

Определим модель Крипке:

- ▶ миры — замкнутые множества формул: $\alpha \in \Gamma$ т.и.т.т. $\Gamma \vdash_{\rightarrow} \alpha$,
- ▶ порядок — (\subseteq) ,
- ▶ $\Gamma \Vdash X$ т.и.т.т. $X \in \Gamma$.

Из корректности моделей Крипке следует, что что если $\Gamma \vdash \alpha$, то $\Gamma \Vdash \alpha$. Требуемое следует из того, что $\Gamma \Vdash \alpha$ влечёт $\Gamma \vdash_{\rightarrow} \alpha$. □

$\Gamma \Vdash \alpha$ т.и.т.т. $\Gamma \vdash_{\rightarrow} \alpha$

Индукция по структуре α .

- ▶ $\alpha \equiv X$. Утверждение следует из определения;
- ▶ $\alpha \equiv \varphi \rightarrow \psi$.
 - ▶ Пусть $\Gamma \Vdash \varphi \rightarrow \psi$. То есть, $\Gamma \subseteq \Delta$ и $\Delta \Vdash \varphi$ влечёт $\Delta \Vdash \psi$. Возьмём Δ как замыкание $\Gamma \cup \{\varphi\}$. Значит, $\Delta \vdash_{\rightarrow} \varphi$ и, по индукционному предположению, $\Delta \Vdash \varphi$. Тогда $\Delta \Vdash \psi$. По индукционному предположению, $\Delta \vdash_{\rightarrow} \psi$. То есть, $\Gamma, \varphi \vdash_{\rightarrow} \psi$, откуда

$$\frac{\Gamma, \varphi \vdash \psi}{\Gamma \vdash \varphi \rightarrow \psi}$$

- ▶ Пусть $\Gamma \vdash_{\rightarrow} \varphi \rightarrow \psi$. Проверим $\Gamma \Vdash \varphi \rightarrow \psi$. Пусть $\Gamma \subseteq \Delta$ и пусть $\Delta \Vdash \varphi$. По индукционному предположению, $\varphi \in \Delta$. То есть, $\Delta \vdash_{\rightarrow} \varphi$ и $\Delta \vdash_{\rightarrow} \varphi \rightarrow \psi$. Тогда

$$\frac{\Delta \vdash_{\rightarrow} \varphi \quad \Delta \vdash_{\rightarrow} \varphi \rightarrow \psi}{\Delta \vdash_{\rightarrow} \psi}$$

По индукционному предположению, $\Delta \Vdash \psi$, отчего $\Gamma \Vdash \varphi \rightarrow \psi$.

Просто-типизированное лямбда-исчисление

Определение

Просто-типизированное лямбда-исчисление (по Карри).

Просто-типизированное лямбда-исчисление

Определение

Просто-типизированное лямбда-исчисление (по Карри). Типы: $\tau ::= \alpha \mid (\tau \rightarrow \tau)$.

Просто-типизированное лямбда-исчисление

Определение

Просто-типизированное лямбда-исчисление (по Карри). Типы: $\tau ::= \alpha | (\tau \rightarrow \tau)$.

Язык: $\Gamma \vdash A : \varphi$

$$\frac{}{\Gamma, x : \varphi \vdash x : \varphi} \quad x \notin \Gamma \qquad \frac{\Gamma, x : \varphi \vdash A : \psi}{\Gamma \vdash \lambda x. A : \varphi \rightarrow \psi} \quad x \notin \Gamma \qquad \frac{\Gamma \vdash A : \varphi \quad \Gamma \vdash B : \varphi \rightarrow \psi}{\Gamma \vdash BA : \psi}$$

Пример: тип чёрчевских нумералов

Пусть $\Gamma = f : \alpha \rightarrow \alpha, x : \alpha$

$$\frac{\frac{\frac{\overline{\Gamma \vdash x : \alpha} \text{Ax}}{\Gamma \vdash f \ x : \alpha} \text{App} \quad \frac{\overline{\Gamma \vdash f : \alpha \rightarrow \alpha} \text{Ax}}{\Gamma \vdash f : \alpha \rightarrow \alpha} \text{App}}{\frac{\{f : \alpha \rightarrow \alpha, x : \alpha\} \Gamma \vdash f (f \ x) : \alpha}{f : \alpha \rightarrow \alpha \vdash \lambda x. f (f \ x) : (\alpha \rightarrow \alpha)} \lambda} \lambda$$

Изоморфизм Карри-Ховарда

λ -исчисление	исчисление высказываний
Выражение	доказательство
Тип выражения	высказывание
Тип функции	импликация
Упорядоченная пара	Конъюнкция
Алгебраический тип	Дизъюнкция
Необитаемый тип	Ложь

Изоморфизм Карри-Ховарда: отрицание

Определение

Ложь (\perp) — необитаемый тип; $failwith/raise/throw : \alpha \rightarrow \perp$; $\neg\varphi \equiv \varphi \rightarrow \perp$

Например, контрапозиция: $(\alpha \rightarrow \beta) \rightarrow (\neg\beta \rightarrow \neg\alpha)$

$$\frac{\frac{\frac{\overline{\Phi \vdash a : \alpha} \text{ Ax} \quad \overline{\Phi \vdash f : \alpha \rightarrow \beta} \text{ Ax}}{\Phi \vdash f a : \beta} \text{ App} \quad \overline{\Phi \vdash n : \beta \rightarrow \perp} \text{ Ax}}{\frac{f : \alpha \rightarrow \beta, n : \beta \rightarrow \perp, a : \alpha \vdash n (f a) : \perp}{f : \alpha \rightarrow \beta, n : \beta \rightarrow \perp \vdash \lambda a^\alpha. n (f a) : \neg\alpha} \lambda} \text{ App} \quad \lambda}{f : \alpha \rightarrow \beta \vdash \lambda n^{\beta \rightarrow \perp}. \lambda a^\alpha. n (f a) : \neg\beta \rightarrow \neg\alpha} \lambda \quad \lambda}{\lambda f^{\alpha \rightarrow \beta}. \lambda n^{\beta \rightarrow \perp}. \lambda a^\alpha. n (f a) : (\alpha \rightarrow \beta) \rightarrow (\neg\beta \rightarrow \neg\alpha)} \lambda$$

Снятие двойного отрицания: $((\alpha \rightarrow \perp) \rightarrow \perp) \rightarrow \alpha$, то есть $\lambda f^{(\alpha \rightarrow \perp) \rightarrow \perp}. ? : \alpha$.

f угадывает, что передать $x : \alpha \rightarrow \perp$. Тогда надо по f угадать, что передать x .

Исчисление по Чёрчу и по Карри

Определение

Просто-типизированное лямбда-исчисление по Карри.

$$\frac{}{\Gamma, x : \varphi \vdash x : \varphi} x \notin \Gamma \quad \frac{\Gamma, x : \varphi \vdash A : \psi}{\Gamma \vdash \lambda x. A : \varphi \rightarrow \psi} x \notin \Gamma \quad \frac{\Gamma \vdash A : \varphi \quad \Gamma \vdash B : \varphi \rightarrow \psi}{\Gamma \vdash BA : \psi}$$

Просто-типизированное лямбда-исчисление по Чёрчу.

$$\frac{}{\Gamma, x : \varphi \vdash x : \varphi} x \notin \Gamma \quad \frac{\Gamma, x : \varphi \vdash A : \psi}{\Gamma \vdash \lambda x^{\varphi}. A : \varphi \rightarrow \psi} x \notin \Gamma \quad \frac{\Gamma \vdash A : \varphi \quad \Gamma \vdash B : \varphi \rightarrow \psi}{\Gamma \vdash BA : \psi}$$

Исчисление по Чёрчу и по Карри

Определение

Просто-типизированное лямбда-исчисление по Карри.

$$\frac{}{\Gamma, x : \varphi \vdash x : \varphi} x \notin \Gamma \quad \frac{\Gamma, x : \varphi \vdash A : \psi}{\Gamma \vdash \lambda x. A : \varphi \rightarrow \psi} x \notin \Gamma \quad \frac{\Gamma \vdash A : \varphi \quad \Gamma \vdash B : \varphi \rightarrow \psi}{\Gamma \vdash BA : \psi}$$

Просто-типизированное лямбда-исчисление по Чёрчу.

$$\frac{}{\Gamma, x : \varphi \vdash x : \varphi} x \notin \Gamma \quad \frac{\Gamma, x : \varphi \vdash A : \psi}{\Gamma \vdash \lambda x^{\varphi}. A : \varphi \rightarrow \psi} x \notin \Gamma \quad \frac{\Gamma \vdash A : \varphi \quad \Gamma \vdash B : \varphi \rightarrow \psi}{\Gamma \vdash BA : \psi}$$

Пример

По Карри	По Чёрчу
$\lambda f. \lambda x. f (f x) : (\alpha \rightarrow \alpha) \rightarrow (\alpha \rightarrow \alpha)$	$\lambda f^{\alpha \rightarrow \alpha}. \lambda x^{\alpha}. f (f x) : (\alpha \rightarrow \alpha) \rightarrow (\alpha \rightarrow \alpha)$

Исчисление по Чёрчу и по Карри

Определение

Просто-типизированное лямбда-исчисление по Карри.

$$\frac{}{\Gamma, x : \varphi \vdash x : \varphi} x \notin \Gamma \quad \frac{\Gamma, x : \varphi \vdash A : \psi}{\Gamma \vdash \lambda x. A : \varphi \rightarrow \psi} x \notin \Gamma \quad \frac{\Gamma \vdash A : \varphi \quad \Gamma \vdash B : \varphi \rightarrow \psi}{\Gamma \vdash BA : \psi}$$

Просто-типизированное лямбда-исчисление по Чёрчу.

$$\frac{}{\Gamma, x : \varphi \vdash x : \varphi} x \notin \Gamma \quad \frac{\Gamma, x : \varphi \vdash A : \psi}{\Gamma \vdash \lambda x^{\varphi}. A : \varphi \rightarrow \psi} x \notin \Gamma \quad \frac{\Gamma \vdash A : \varphi \quad \Gamma \vdash B : \varphi \rightarrow \psi}{\Gamma \vdash BA : \psi}$$

Пример

По Карри	По Чёрчу
$\lambda f. \lambda x. f (f x) : (\alpha \rightarrow \alpha) \rightarrow (\alpha \rightarrow \alpha)$	$\lambda f^{\alpha \rightarrow \alpha}. \lambda x^{\alpha}. f (f x) : (\alpha \rightarrow \alpha) \rightarrow (\alpha \rightarrow \alpha)$
$\lambda f. \lambda x. f (f x) : (\beta \rightarrow \beta) \rightarrow (\beta \rightarrow \beta)$	$\lambda f^{\beta \rightarrow \beta}. \lambda x^{\beta}. f (f x) : (\beta \rightarrow \beta) \rightarrow (\beta \rightarrow \beta)$

Комбинаторы S, K

Определение

Комбинатор — лямбда-терм без свободных переменных

Определение (исходная идея Моисея Шейнфинкеля, 1924)

$S := \lambda x. \lambda y. \lambda z. x \ z \ (y \ z)$, $K := \lambda x. \lambda y. x$, $I := \lambda x. x$

(*verSchmelzung*, *Konstanz* — исходно «C» у Шейнфинкеля, *Identität*)

Теорема

Пусть N — некоторый замкнутый лямбда-терм. Тогда найдётся выражение M , состоящее из комбинаторов S, K , что $N =_{\beta} M$

Комбинаторы S, K

Определение

Комбинатор — лямбда-терм без свободных переменных

Определение (исходная идея Моисея Шейнфинкеля, 1924)

$S := \lambda x. \lambda y. \lambda z. x \ z \ (y \ z)$, $K := \lambda x. \lambda y. x$, $I := \lambda x. x$

(*verSchmelzung*, *Konstanz* — исходно «C» у Шейнфинкеля, *Identität*)

Теорема

Пусть N — некоторый замкнутый лямбда-терм. Тогда найдётся выражение M , состоящее из комбинаторов S, K , что $N =_{\beta} M$

Пример

$$I =_{\beta} S \ K \ K$$

$$K := \lambda x^{\alpha}. \lambda y^{\beta}. x$$

$$\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \alpha$$

$$S := \lambda x^{\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \gamma}. \lambda y^{\alpha \rightarrow \beta}. \lambda z^{\alpha}. x \ z \ (y \ z) \quad (\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \gamma) \rightarrow (\alpha \rightarrow \beta) \rightarrow \alpha \rightarrow \gamma$$