

計算と論理

Jacques Garrigue, 2020 年 11 月 5 日

4 ラムダ計算

ドイツの論理学者 Schönfinkel が 1920 年代に作った論理コンビネータは元々論理の証明論のための道具だった。1930 年代に Curry と Church がそれを λ 計算に発展させると、論理的な意味と同時に計算的な意味を持つようになった。その後、計算機科学との関係がだんだん深くなり、1950 年代からリスプから始まる関数型言語の重要な基礎となった。簡単な定義で表現力が強いので、一般的にプログラミング言語のモデルとして使われる。

4.1 項書換系

元々はそうではなかったが、λ 計算は項書換系によって定義すると分かりやすい。計算を項の一部の書き換えとして見る、ということだ。例えば、数式の数換系を次のように定義できる。

項 (term) $E ::= \mathcal{R} \mid (E + E) \mid (E - E) \mid (E \times E) \mid (E/E)$

書換規則 x, y は \mathcal{R} の実数ならば、

$$\begin{aligned}(x + y) &\rightarrow x + y \\(x - y) &\rightarrow x - y \\(x \times y) &\rightarrow x \times y \\(x/y) &\rightarrow x/y\end{aligned}$$

(($x + y$) は数式だが、 $x + y$ は実数である)

上の規則を簡約規則ともいう。

簡約の例

$$(15 + (1/4)) \times (5 - 2) \rightarrow (15 + 0.25) \times (5 - 2) \rightarrow (15.25) \times 3 \rightarrow 45.75$$

4.2 λ 計算の構文 (syntax)

定義 4.1 λ 項 (λ-term) は次の三つの構文からできている。

$$\begin{aligned}M &::= x && \text{変数 (variable)} \\ & \mid \lambda x.M && \text{抽象 (abstraction)} \\ & \mid M M && \text{適用 (application)}\end{aligned}$$

x は文脈 (環境) で定義されている値 (別の λ 項) を指す。

$\lambda x.M$ は項 M の中に使われている変数 x を束縛する。関数として見れば $f = \lambda x.M$ という定義は、普段の $f(x) = M$ 。ただし、 $\lambda x.M$ と書くとき、名前をつける必要がないという便利さがある。

$M_1 M_2$ は関数の適用である。普段の $M_1(M_2)$ にあたるが、 M_1 は名前 (変数) だけでなく、どの λ 項でもよい。

上の文法を普通の数式と混ぜると、

$$f(x) = x + 1 \text{ のとき } f(2)$$

が1回で書ける。

$$(\lambda x. x + 1) 2$$

括弧の使い方 構文では括弧を書かなかったが、曖昧性を解決するのに適宜括弧を使う。

$$\begin{aligned} \lambda x. M N &= \lambda x. (M N) \\ \lambda x. \lambda y. M &= \lambda x. (\lambda y. M) \\ M N P &= ((M N) P) \end{aligned}$$

自由変数 $\lambda x. M$ では、 M 中の全ての x の出現は「束縛されている」という。ある項 M の中で、 x が使われながら、束縛されていないのであれば、 x は M の自由変数である。 M の自由変数の集合 $FV(M)$ は帰納的に次の3条で定義される。

$$\begin{aligned} FV(x) &= \{x\} \\ FV(\lambda x. M) &= FV(M) \setminus \{x\} \\ FV(M N) &= FV(M) \cup FV(N) \end{aligned}$$

代入 代入は自由変数の値を変える。 $([N/x]M)$ は項 M 中に出現するすべての自由な x を N で置き換える。

$$\begin{aligned} ([N/x]x) &= N \\ ([N/x]y) &= y && y \neq x \\ ([N/x]\lambda y. M) &= \lambda y. ([N/x]M) && y \notin FV(N) \cup \{x\} \\ ([N/x](M M')) &= (([N/x]M) ([N/x]M')) \end{aligned}$$

3条目では、 y は N の自由変数であってはならない。そのためには、次の α 変換が許される。 z は N の自由変数でなければ、

$$\lambda y. N \leftrightarrow \lambda z. ([z/y]N)$$

こういう束縛変数の改称は常に許される。

4.3 簡約規則

定義 4.2 λ 項、 α 変換と次の β 簡約で構成される項書き換え系は λ 計算という。

$$((\lambda x. M) N) \rightarrow ([N/x]M)$$

例題 4.1 簡約の例

$$\begin{aligned} &(\lambda f. \lambda g. \lambda x. f x (g x)) (\lambda x. \lambda y. x) (\lambda x. \lambda y. x) \\ \rightarrow &\lambda x. ((\lambda x. \lambda y. x) x ((\lambda x. \lambda y. x) x)) \\ \rightarrow &\lambda x. ((\lambda y. x) (\lambda y. x)) \\ \rightarrow &\lambda x. x \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &(\lambda x. (x x)) (\lambda x. (x x)) \\ \rightarrow &(\lambda x. (x x)) (\lambda x. (x x)) \\ \rightarrow &\dots \end{aligned}$$

定理 4.1 λ 計算は合流性を持つ。 $M \rightarrow \dots \rightarrow N$ と $M \rightarrow \dots \rightarrow P$ という二つの簡約列があれば、 $N \rightarrow \dots \rightarrow T, P \rightarrow \dots \rightarrow T$ となるような T が存在する。

4.4 λ 計算は万能である

全てのプログラムは λ 計算で書ける。

自然数 チャーチによるエンコーディングがある (Church numeral)。

$$\begin{aligned} c_n &= \lambda f. \lambda x. (f \dots (f x) \dots) && f \text{ を } n \text{ 回適用する} \\ c_+ &= \lambda m. \lambda n. \lambda f. \lambda x. (m f (n f x)) && \text{加算} \\ c_\times &= \lambda m. \lambda n. \lambda f. (m (n f)) && \text{積算} \end{aligned}$$

練習問題 4.1 1. $(c_3 (\lambda x. x x) y)$ の標準形を計算せよ。

2. $(c_2 c_3)$ の標準形を計算せよ。

3. m^n を計算する λ 項 c_{pow} を与えよ。

ブール環 次のエンコーディングを使う。

$$t = \lambda x. \lambda y. x \qquad f = \lambda x. \lambda y. y \qquad \text{not} = \lambda b. \lambda x. \lambda y. (b y x)$$

数の区別も可能で、例えば次の項が引き数に数をもらい、真偽値を返す。

$$\text{if0} = \lambda n. (n (\lambda x. f) t)$$

組 λ 計算では組が簡単に表現できる。

$$\text{pair} = \lambda x. \lambda y. \lambda f. (f x y) \qquad \text{fst} = \lambda p. (p t) \qquad \text{snd} = \lambda p. (p f)$$

計算して見ると、

$$\text{fst} (\text{pair } a \ b) \rightarrow \text{pair } a \ b \ t \rightarrow (t \ a \ b) \rightarrow a$$

引き算 チャーチエンコーディングによる引き算は比較的難しい。ここに一つの定義を与える。

$$\begin{aligned} c_- &= \lambda m. \lambda n. (n \ p \ m) \\ s &= \lambda n. \lambda f. \lambda x. (f (n f x)) \\ s' &= \lambda x. (\text{pair} (\text{snd } x) (s (\text{snd } x))) \\ p &= \lambda n. (\text{fst} (n \ s' (\text{pair } c_0 \ c_0))) \end{aligned}$$

s は足す 1 を計算し、 p は引く 1 を計算する。足し算は既に定義したので、 s はすぐ定義できるが、 p のためには補助関数 s' を使う。

s' は自然数の組 (m, n) に対して $(n, m + 1)$ を返す関数である。それを $(0, 0)$ に繰り返し適用すると、順番に $(0, 1), (1, 2), (2, 3) \dots$ が得られる。第一要素がちょうど適用回数引く 1 という値になるので、それを返すと前者関数になる。

最後に、 $m - n$ を計算するために、 m に n 回 p を適用すればいい。よって、 $m \geq n$ ならば、

$$c_- \ c_m \ c_n \xrightarrow{*} c_{m-n}$$

不動点演算子 再起的な関数を定義するのに、不動点演算子 Y が必要になる。その基本的な属性は、 $(Y M)$ が $(M (Y M))$ に簡約できることである。

$$Y = (\lambda f. \lambda x. (x (f f x))) (\lambda f. \lambda x. (x (f f x)))$$

Y はループを回す回数分からないとき必要になる。例えば、階数の再帰的な定義は次の通りである。

$$\begin{aligned} 0! &= 1 \\ n! &= n \times (n-1)! \quad \text{if } n > 0 \end{aligned}$$

それを λ 計算に翻訳するとこうなる。

$$c_! = \lambda n. \text{if0 } n \ c_1 \ (c_{\times} \ n \ (c_! \ (p \ n)))$$

こういう再帰的な定義は ($c_!$ は右にも出ている) λ 計算では直接にできないので、 Y を使う。

$$c_! = Y(\lambda f. \lambda n. \text{if0 } n \ c_1 \ (c_{\times} \ n \ (f \ (p \ n))))$$

$YM \rightarrow M(YM)$ というのを思い出せば、上の方程式が成り立つことが分かる。

$$c_! \rightarrow (\lambda f. \lambda n. \text{if0 } n \ c_1 \ (c_{\times} \ n \ (f \ (p \ n)))) \ c_! \rightarrow \lambda n. \text{if0 } n \ c_1 \ (c_{\times} \ n \ (c_! \ (p \ n)))$$

因みに、階乗関数では繰り返しの回数があらかじめ分かるので、 Y を使わなくても定義できる。

$$c_! = \lambda n. \text{snd } (n \ (\lambda x. \text{pair } (s \ (\text{fst } x)) \ (c_{\times} \ (\text{fst } x) \ (\text{snd } x)))) \ (\text{pair } c_1 \ c_1)$$

しかし、不動点を使えば、止まるかどうか分からない関数も定義できる。

$$Y \ (\lambda f. \lambda x. s \ (f \ x)) \ c_1 \rightarrow s \ (Y \ (\lambda f. \lambda x. s \ (f \ x)) \ c_1) \rightarrow s \ (s \ (Y \ (\lambda f. \lambda x. s \ (f \ x)) \ c_1)) \rightarrow \dots$$

4.5 評価戦略

ラムダ計算は計算機械ではない。なぜかといえば、簡約という計算機構があっても、それをどの順番で行うか、あるいはいつ計算が終わるか、が定まっていない。標準形と戦略はちょうどそれを決める役割をはたしている。

標準形 簡約できる個所を全く残さない(既約)標準形以外にも、先頭の部分だけが簡約できない弱冠頭標準形も定義できる。例えば $(x \ ((\lambda y. y) \ z))$ や $\lambda x. ((\lambda y. y) \ z)$ は既約標準形でない (y がまだ簡約できる) が弱冠頭標準形である。形式化すると、 $\lambda x. M$ または $(x \ M_1 \ \dots \ M_n)$ のどちらかの形をしたものが弱冠頭標準形である。

最左戦略 最も左にある簡約できる個所を先に簡約する。名前呼び出し (call-by-name) に当る。関数の引数を評価せずに、そのまま代入する。 $(\lambda x. x) \ ((\lambda y. y) \ z) \rightarrow ((\lambda y. y) \ z)$ 。ある戦略で $M \rightarrow^* N$ (N 標準形) のとき、最左戦略でも $M \rightarrow^* N$ 。

最右最内戦略 最も右にある簡約できる個所の中で、最も中にあるものを選ぶ。値呼び出し (call-by-value) に当る。関数の引数を標準形に落してから代入する。 $(\lambda x. x) \ ((\lambda y. y) \ z) \rightarrow ((\lambda x. x) \ z)$ 。ある戦略で $M \rightarrow^* \dots$ (無限に続く簡約) のとき、最右最内戦略でも無限な簡約になる。

λ 機械 標準形と戦略の組み合わせを選ぶと、任意の λ 項をある λ 機械によって決定的に実行されるプログラムとしてみる事ができる。