

algebraic effects を含むプログラムのステップ実行

古川 つきの, 浅井 健一

お茶の水女子大学

furukawa.tsukino@is.ocha.ac.jp, asai@is.ocha.ac.jp

概要 ステップはプログラムの実行過程を見せるツールである。これまで様々な言語に対するステップが作られてきたが、shift/reset や algebraic effects といった継続を明示的に扱う言語機能をサポートするステップは作られていない。継続を扱うプログラムの挙動を理解するのは困難なので、そういった言語に対応したステップを作ることが本研究の目的である。

ステップは簡約のたびにその時点でのプログラム全体を出力するインタプリタなので、実行している部分式のコンテキストの情報が常に必要になる。継続を扱うような複雑な機能を持つ言語を対象にしたステップでは、コンテキストがどのような構造をしているかが自明でない。そこで、通常のインタプリタ関数をプログラム変換することで機械的にコンテキストの情報を保持させ、ステップを実装する方法を示す。

実際に型無しλ計算と algebraic effects から成る言語について実装方法を示し、それをもとにして実装した Multicore OCaml を対象としたステップを紹介する。

1 はじめに

プログラムの実行の様子を確認する方法に、実行が1段階進むごとにどのような状態になっているのかを書き連ねる方法がある。このツールは、代数的ステップ（以後、単にステップと書く）と呼ばれ、プログラムが代数的に書き換わる様子を1ステップずつ表示してくれるものである。例えば OCaml のプログラム `let a = 1 + 2 in 4 + a` を入力されると、ステップは以下のような実行ステップを表す文字列を出力する。

Step 0: (let a = (1 + 2) in (4 + a))

Step 1: (let a = 3 in (4 + a))

Step 1: (let a = 3 in (4 + a))

Step 2: (4 + 3)

Step 2: (4 + 3)

Step 3: 7

このように1段階ずつ確認していけば、具体的にどのような計算がされるのかを観察することができ、プログラムの動きを理解しやすい。またこの方法はデバッグにおいても有用で、どの段階で想定と違うことが起こっているのかが見えるので、プログラムのどの部分がその原因なのかが分かりやすくなる。そのため、お茶の水女子大学では実際に関数型言語の授業でステップを本格的に使用している。

しかし、継続を操作するようなプログラムだった場合、ステップをどのように作ったら良いのかは明らかではない。そのような複雑なプログラムでこそ実行の様子を詳細に追いたいところだが、現在のところそのような言語に対するステップは作られていない。わずかに、我々が過去の研究 [3] で例外処理のための構文 try-with を含む言語についてのステップを実装した程度である。

そこで我々は、ステップを、継続を明示的に扱う言語機能に対応させることを目指している。ステップは、通常のインタプリタ関数に出力機能を追加することで実装できるが、その際、式全体を再構成するためにコンテキストの情報が必要になる。以前の研究 [3] では、部分式の簡約に進むたびにコンテキストを表すデータ型を作成していたが、継続を操作するようなプログラムの場合、どのようなコンテキストにすれば良いのかは即座には明らかではない。

そこで、本論文では、インタプリタに対して CPS 変換 [7] と非関数化 [9] を施すことで機械的にコンテキストの情報を得る。この方法を使うと、継続を操作するような言語でも機械的にコンテキストの情報を得ることができ、それを使ってステップを作ることができるようになる。本論文では、この手法を algebraic effects を含む言語に対して適用し、algebraic effects を含む言語に対するステップを作成する。また、その過程で algebraic effects を含む言語に対する definitional interpreter を示す。本論文では詳しくは述べないが、この手法は shift/reset に対するステップの作成にも使うことができる。

本論文の構成は以下の通りである。(後で追加。)

2 ステップの実装方法とコンテキスト

ステップは small-step による実行と同じなので、small-step のインタプリタを書けば実装できる。実際、Whittington & Ridge [10] は small-step のインタプリタを書くことで OCaml に対するステップを実装している。しかし、small-step のインタプリタをメンテナンスするのは簡単ではない。また、ステップ実行中に関数呼び出し単位でスキップする機能をつけようと思うとインタプリタは big-step で書かれていた方が都合が良い。そこで、我々の過去の研究 [3] では、big-step のインタプリタを元にしてステップを作成している。ここでも、そのアプローチをとる。

図 1 に OCaml による型無し λ 計算の定義と代入ベースの big-step インタプリタの実装を示す。関数 `subst : e -> (string * v) list -> e` は代入関数であり、`subst e [(x, v)]` は式 `e` の中の全ての変数 `x` を値 `v` に置換した式を返す。

このインタプリタをステップにするには、簡約をする際に簡約前後のプログラムを出力する機能を追加すればよい。しかしステップが出力したいのは実行中の部分式ではなく式全体であり、コンテキストを含めた式全体を出力するためには、実行中の式の構文木の他にコンテキストの情報が必要である。

コンテキストの情報を得るために、Clements ら [2] は Racket の continuation mark を使用してコンテキストフレームの情報を記録することでステップを実装した。本研究ではそのような特殊な機能は使わずに、インタプリタ関数に明示的にコンテキスト情報のための引数を追加する。図 1 のインタプリタにその変更を施すと、図 2 のようになる。ここで、関数 `memo : e -> e -> c -> unit` は、簡約前の式、簡約後の式、コンテキスト情報の 3 つを引数にとり、コンテキスト情報を利用して簡約前後の式全体をそれぞれ出力するものである。

図 2 のように、コンテキストを表すデータ型を定義して再帰呼び出し時の構造に合わせて引数として渡すようにすれば、式全体を再構成して出力することが可能になる。ここで、コンテキストを表すデータ型は、評価文脈そのものになっていることに気がつく。評価文脈のデータ型は、big-step のインタプリタを CPS 変換し、非関数化すると機械的に得られることが知られている。これは、我々が手動で定義したコンテキストのデータは、機械的に導出できることを示唆している。

λ 計算に対するステップであれば、手動でコンテキストの型を定義するのは簡単だが、言語が複雑になると必ずしもこれは自明ではない。実際、以前の研究 [3] で try-with 構文を含む言語のステップを実装したときには、コンテキストを try-with 構文で区切る必要があったため、コンテキストの構造が一次的でなく、リストのリストになった。algebraic effects などが入った場合、どのようなコンテキストを使えば良いのかはまた別途、考慮する必要がある。このような場合、機

```

(* 値 *)
type v = Var of string      (* x *)
      | Fun of string * e   (* fun x -> e *)

(* 式 *)
type e = Val of v           (* 値 *)
      | App of e * e        (* e e *)

(* インタプリタ *)
let rec eval (exp : e) : v = match exp with
| Val (v) -> v              (* 値ならそのまま返す *)
| App (e1, e2) ->
  (let v2 = eval e2 in      (* 引数部分を実行 *)
   let v1 = eval e1 in      (* 関数部分を実行 *)
   let reduct = match v1 with
   | Fun (x, e) -> subst e [(x, v2)] (* 代入 e[v2/x] *)
   | _ -> failwith "type error" in (* 関数部分が関数でなければ型エラー *)
   eval reduct)             (* 代入後の式を実行 *)

```

図 1. 型無し λ 計算とそのインタプリタ

```

(* コンテキスト *)
type c = CId                (* []. *)
      | CApp2 of e * c      (* [e [].] *)
      | CApp1 of v * c      (* [[.] v] *)

(* 出力しながら再帰的に実行 *)
let rec eval (exp : e) (c : c) : v = match exp with
| Val (v) -> v
| App (e1, e2) ->
  (let v2 = eval e2 (CApp2 (e1, c)) in (* コンテキストを 1 層深くする *)
   let v1 = eval e1 (CApp1 (v2, c)) in (* コンテキストを 1 層深くする *)
   let redex = App (Val v1, Val v2) in
   let reduct = match v1 with
   | Fun (x, e) -> subst e [(x, v2)]
   | _ -> failwith "type error" in
   memo redex reduct c; (* コンテキストを利用して式全体を出力 *)
   eval reduct c)

(* 実行を始める *)
let stepper (exp : e) = eval exp CId

```

図 2. 型無し λ 計算に対するステップ

械的にコンテキストの定義を導出できることにはメリットがある。次節以降ではそのような方針で algebraic effects に対するステップを導出する。

3 Algebraic effects とインタプリタの定義

この節では、algebraic effects を導入した後、型無し λ 計算と algebraic effects からなる言語を示し、そのインタプリタを定義する。

3.1 algebraic effects

algebraic effects は、例外や状態などの副作用を表現するための一般的な枠組で、副作用を起こす部分（オペレーション呼び出し）と処理する部分（ハンドラ）からなる [8]。特徴は、副作用の意味がそれを処理するハンドラ部分で決まるところである。例えば、以下のプログラムを考える。

```
with handler {return x -> x;
              op(x; k) -> k (x + 1)}
handle 10 + op(3)
```

`with h handle e` は、`h` というハンドラのもとで式 `e` を実行するという意味である。`e` の部分を見ると `10 + op(3)` とあるので加算を行おうとするが、そこで `op(3)` というオペレーション呼び出しが起こる。オペレーション呼び出しというのは副作用を起こす命令で、直感的にはここで例外 `op` を引数 3 で起こすのに近い。使えるオペレーションはあらかじめ宣言するのが普通だが、本論文では使用するオペレーションは全て定義されていると仮定する。

オペレーション呼び出しが起こると、プログラムの制御はハンドラ部分に移る。ハンドラは正常終了を処理する部分 `return x -> ...` とオペレーション呼び出しを処理する部分に分かれている。正常終了する部分は `with h handle e` の `e` 部分の実行が終了した場合に実行され、`x` に実行結果が入る。上の例なら、その `x` がそのまま返されて、これがプログラム全体の結果となる。

一方、`e` の実行中にオペレーション呼び出しがあった場合は、オペレーション呼び出しの処理が行われる。まず、呼び出されたオペレーションが処理するオペレーションと同じものかがチェックされる。異なる場合は、そのオペレーションはここでは処理されず、さらに外側の `with handle` 文で処理されることになる。（最後まで処理されなかったら、未処理のオペレーションが報告されてプログラムは終了する。）一方、ここで処理すべきオペレーションと分かった場合には、矢印の右側の処理に移る。ここで、`x` の部分にはオペレーションの引数が入り、`k` の部分には「オペレーション呼び出しから、この `with handle` 文までの限定継続」が入る。`k` に限定継続が入るところが例外とは異なる部分である。上の例では、矢印の右側が `k (x + 1)` となっているので、`x` の値である 3 に 1 が加わった後、もとの計算である `10 + [.]` が再開され、全体として 14 が返ることになる。

algebraic effects の特徴は、オペレーション呼び出しの意味がハンドラで決まる部分にある。`op(3)` とした時点ではこの処理の内容は未定だが、ハンドラ部分に `k (x + 1)` と書かれているため、結果として `op` は 1 を加えるような作用だったことになる。

3.2 構文の定義

型無し λ 計算と algebraic effects からなる対象言語を図 3 の `e` と定義する。ただし継続 `fun x => e` は入力プログラムに含まれることはなく、実行の過程のみで現れる構文である。`h` のオペレーション節に出てくる `op` たちは互いに全て異ならなくてはならない。

v :=	(値)
x	変数
fun x -> e	関数
fun x => e	継続
e :=	(式)
v	値
e e	関数適用
op e	オペレーション呼び出し
with h handle e	ハンドル
h :=	(ハンドラ)
handler {return x -> e;	return 節
op(x; k) -> e; ...; op(x; k) -> e}	オペレーション節 (0 個以上)

図 3. 対象言語の構文

```

(* 値 *)
type v = Var of string      (* x *)
      | Fun of string * e   (* fun x -> e *)
      | Cont of (k -> k)    (* 継続 fun x => ... *)

(* ハンドラ *)
and h = {
  return : string * e;      (* {return x -> e;      *}
  ops : (string * string * e) list (* op(x; k) -> e; ...} *)
}

(* 式 *)
and e = Val of v            (* v *)
      | App of e * e        (* e e *)
      | Op of string * e    (* op e *)
      | With of h * e       (* with h handle e *)

(* handle 内の継続 *)
and k = v -> a

(* handle 内の実行結果 *)
and a = Return of v         (* 値になった *)
      | OpCall of string * v * k (* オペレーションが呼び出された *)

```

図 4. 対象言語の定義

3.3 CPS インタプリタによる意味論

この節では、algebraic effects を含む言語に対する意味論を与える。オペレーション呼び出しにより非局所的に制御が移るので、意味論は CPS インタプリタを定義することで与える。対象言語の OCaml による定義を図 4 に示す。ここで k は各ハンドラ内部の限定継続を表す。また、 a は `handle` 節内の式の実行が正常終了したのかオペレーション呼び出しだったのかを示す型である。

図 4 の言語に対する call-by-value かつ right-to-left のインタプリタを図 5 に定義する。ただし、関数 `subst : e -> (string * v) list -> e` は代入のための関数であり、`subst e [(x, v); (k, cont_value)]` は e の中の変数 x と変数 k に同時にそれぞれ値 v と値 `cont_value` を代入した式を返す。関数 `search_op` はハンドラ内のオペレーションを検索する関数で、例えば `handler {return x -> x; op1(y, k) -> k y}` を表すデータを h とすると `search_op "op2" h` は `None` を返し `search_op "op1" h` は `Some (y, k, App (Var "k", Var "y"))` を返す。

このインタプリタは、`handle` 節内の実行については普通の CPS になっており、メタ継続である k は「直近のハンドラまでの継続」である。関数 `eval` の下から 2 行目で `with handle` 文を実行する際、再帰呼び出しの継続として `(fun x -> Return x)` を渡していて、これによって `handle` 節の実行に入るたびに渡す継続を初期化している。

`handle` 節内を実行した結果を表すのが a 型である。`handle` 節内の実行は、オペレーション呼び出しが行われない限りは通常の CPS インタプリタによって進むが、オペレーション呼び出しが行われた場合 (`eval` の下から 4 行目) は引数 e を実行後、結果を継続 k に渡すことなく `OpCall` を返している。これが `handle` 節の結果となり、`eval` の最下行で `apply_handler` に渡される。一方、`handle` 節内の実行が正常終了した場合は、初期継続 `(fun x -> Return x)` に結果が返り、それが `apply_handler` に渡される。

`apply_handler` は、そのときの継続 k 、処理すべきハンドラ h 、そして `handle` 節内の実行結果 a を受け取ってハンドラの処理をする。関数 `apply_handler` の動作は `handle` 節の実行結果とハンドラの内容によって 3 種類ある。

1. `handle` 節が値 v になった場合：ハンドラの `return` 節 `return x -> e` を参照して、 $e[v/x]$ を実行
2. `handle` 節がオペレーション呼び出し `OpCall (name, v, k')` になった場合で、そのオペレーション `name` がハンドラ内で定義されていなかった場合：さらに外側の `with handle` 文に処理を移すため、`handle` 節内の限定継続 k' に、1 つ外側の `handle` までの限定継続を合成した継続 `fun v -> ...` を作り、それを `OpCall (name, v, (fun v -> ...))` と返す
3. `handle` 節がオペレーション呼び出し `OpCall (name, v, k')` になった場合で、そのオペレーション `name` がハンドラ内で定義されていた場合：そのハンドラの定義 `name (x; y) -> e` を参照し、 $e[v/x, \text{cont_value}/y]$ を実行する。(cont_value については、以下の説明を参照。)

オペレーション呼び出しを処理する際に k に束縛する限定継続 `cont_value` は、「オペレーション呼び出し時の限定継続 k' 」に「現在のハンドラ h 」と「`cont_value` が呼び出された時の継続 k'' 」を合成したものである。ここで、 k 内の実行を現在のハンドラ h の中で行うのは deep ハンドラと呼ばれる方式 [6] を採用しているためである。shallow ハンドラと呼ばれる方式 [4] を採用する場合は、 k 内の実行は現在のハンドラ h の外で行われるので、`cont_value` の代わりに単に `fun k' -> fun v -> k'' (k' v)` とすれば良い。

このようにして作られた限定継続が呼び出されるのは `eval` の `App` の `Cont` のケースである。`cont_value` は、この継続が呼び出された時点での限定継続が必要なので、それを `cont_value k` のように渡してから値 $v2$ を渡している。shallow ハンドラを採用している場合は、`Cont` に格納する継続を単に k' として、それを適用する際に k (`cont_value v2`) とすれば良い。

```

(* CPS インタプリタ *)
let rec eval (exp : e) (k : k) : a = match exp with
| Val (v) -> k v    (* 継続に値を渡す *)
| App (e1, e2) ->
    eval e2 (fun v2 -> (* FApp2 に変換される関数 *)
        eval e1 (fun v1 -> match v1 with (* FApp1 に変換される関数 *)
            | Fun (x, e) ->
                let reduct = subst e [(x, v2)] in (* e[v2/x] *)
                eval reduct k
            | Cont (cont_value) -> (cont_value k) v2
                (* 現在の継続と継続値が保持するメタ継続を合成して値を渡す *)
            | _ -> failwith "type error"))
| Op (name, e) ->
    eval e (fun v -> OpCall (name, v, k)) (* FOp に変換される関数 *)
| With (h, e) ->
    let a = eval e (fun v -> Return v) in (* FId に変換される関数、空の継続 *)
    apply_handler k h a (* handle 節内の実行結果をハンドラで処理 *)

(* handle 節内の実行結果をハンドラで処理する関数 *)
and apply_handler (k : k) (h : h) (a : a) : a = match a with
| Return v -> (* handle 節内が値 v を返したとき *)
    (match h with {return = (x, e)} -> (* handler {return x -> e, ...} として*)
        let reduct = subst e [(x, v)] in (* e[v/x] に簡約される *)
        eval reduct k) (* e[v/x] を実行 *)
| OpCall (name, v, k') -> (* オペレーション呼び出しがあったとき *)
    (match search_op name h with
    | None -> (* ハンドラで定義されていない場合、 *)
        OpCall (name, v, (fun v -> (* FCall に変換される関数 *)
            let a' = k' v in (* OpCall の継続の後に現在の継続を合成 *)
            apply_handler k h a'))
    | Some (x, y, e) -> (* ハンドラで定義されている場合、 *)
        let cont_value =
            Cont (fun k'' -> fun v -> (* 適用時にその後の継続を受け取って合成 *)
                let a' = k' v in
                apply_handler k'' h a') in (* FCall に変換される関数 *)
        let reduct = subst e [(x, v); (y, cont_value)] in
        eval reduct k)

(* 初期継続を渡して実行を始める *)
let interpreter (e : e) : a = eval e (fun v -> Return v) (* FId に変換される関数 *)

```

図 5. 継続渡し形式で書かれたインタプリタ

```

and k = FId                (* [.] *)
  | FApp2 of e * k          (* [e [.] ] *)
  | FApp1 of v * k          (* [[.] v] *)
  | FOp of string * k       (* [op [.] ] *)
  | FCall of k * h * k      (* [with h handle [[.]]] *)

```

図 6. 非関数化後の継続の型

これまで、algebraic effects の意味論は small-step のもの [6, 8] 以外には CPS で書かれた big-step のもの [5] が提示されてきたが、この意味論はすでに部分式に名前が与えられている（A-正規形になっている）ことを仮定している上に、毎回、捕捉する継続を計算しているなど実装には必ずしも合ったものとは言えなかった。ここで示した CPS インタプリタは単純で、ハンドラの意味を的確に捉えているのに加えて、deep ハンドラと shallow ハンドラの違いも簡潔に表現できており、algebraic effects の定義を与えるインタプリタ (definitional interpreter) と捉えて良いのではないかと考えている。

4 インタプリタの変換

本節では、3 節で定義したインタプリタ (図 5) に対して、正当性の保証された 2 種類のプログラム変換（非関数化と CPS 変換）をかけることで、コンテキストを明示的に保持するインタプリタを得て、そこからステッパを作成する方法を示す。

4.1 非関数化

2 節で示したインタプリタは直接形式だったので、コンテキスト情報を得るのに CPS 変換をかけてから非関数化をかけたが、section:definition 節で示したインタプリタはオペレーション呼び出しをサポートするため最初から CPS で書かれている。したがって、ここではまず非関数化をかける。

非関数化というのは、高階関数を 1 階のデータ構造で表現する方法である。高階関数は全てその自由変数を引数に持つような 1 階のデータ構造となり、高階関数を呼び出していた部分は apply 関数の呼び出しとなる。この apply 関数は、高階関数が呼び出されていたら行ったであろう処理を行うように別途、定義されるものである。この変換は機械的に行うことができる。

具体的に図 5 のプログラムの継続 k 型の λ 式を非関数化するには次のようにする。結果は図 6 と図 7 のようになる。

1. 継続を表す λ 式をコンストラクタに置き換える。その際、 λ 式内の自由変数はコンストラクタの引数にする。その結果、得られるデータ構造は図 6 のようになる。図 5 の中には、コメントとしてどの関数がどのコンストラクタに置き換わったのかが書かれている。
2. 関数を表すコンストラクタと引数を受け取って中身を実行するような apply 関数を定義する。これは、図 7 では `apply_in` と呼ばれている。
3. λ 式を呼び出す部分を、apply 関数にコンストラクタと引数を渡すように変更する。

非関数化したインタプリタを見るといくつかのことがわかる。まず、図 6 を見ると、ラムダ計算の通常の評価文脈に加えてオペレーション呼び出しの引数を実行するフレーム `FOp` と捕捉された継続が呼び出されたときのフレーム `FCall`

（書き途中。ここで、この時点で得られたものをまとめるとともに、ステッパにするには何が足りていないかを書きたい。そして、それを、さらに CPS 変換して非関数化する動機にしたい。）

（手を加えたのはここまで。この先の実装が定まらなそうと書き進められない感じ。）


```

(* CPS インタプリタを非関数化した関数 *)
let rec eval (exp : e) (k : k) : a = match exp with
| Val (v) -> apply_in k v (* 継続適用関数に継続と値を渡す *)
| App (e1, e2) -> eval e2 (FApp2 (e1, k))
| Op (name, e) -> eval e (FOp (name, k))
| With (h, e) ->
    let a = eval e FId in (* 空の継続を渡す *)
    apply_handler k h a (* handle 節内の実行結果をハンドラで処理 *)

(* handle 節内の継続を適用する関数 *)
and apply_in (k : k) (v : v) : a = match k with
| FId -> Return v (* 空の継続、そのまま値を返す *)
| FApp2 (e1, k) -> let v2 = v in
    eval e1 (FApp1 (v2, k))
| FApp1 (v2, k) -> let v1 = v in
    (match v1 with
    | Fun (x, e) ->
        let reduct = subst e [(x, v2)] in
        eval reduct k
    | Cont (k') ->
        apply_in (k' k) v2
    | _ -> failwith "type error")
| FOp (name, k) -> OpCall (name, v, k) (* この handle 節の実行結果は OpCall *)
| FCall (k'', h, k') -> (* k''[with h handle k'[v]] *)
    let a = apply_in k' v in (* handle 節までの継続を適用 *)
    apply_handler k'' h a (* a をハンドラ h で処理して、その後 k'' を適用 *)

(* handle 節内の実行結果をハンドラで処理する関数 *)
and apply_handler (k : k) (h : h) (a : a) : a = match a with
| Return v ->
    (match h with {return = (x, e)} ->
    let reduct = subst e [(x, v)] in
    eval reduct k)
| OpCall (name, v, k') ->
    (match search_op name h with
    | None -> OpCall (name, v, FCall (k, h, k'))
    | Some (x, y, e) ->
        let cont_value = Cont (fun k -> FCall (k, h, k')) in
        let reduct = subst e [(x, v); (y, cont_value)] in
        eval reduct k)

(* 初期継続を渡して実行を始める *)
let stepper (e : e) : a = eval e FId

```

図 7. CPS インタプリタを非関数化したプログラム

4.2 CPS 変換

図 7 では、末尾再帰でない再帰呼び出しの際に継続が初期化されてしまうせいでコンテキスト全体に対応する情報が継続に含まれなかったため、全ての継続を引数に持つようにするため、さらに CPS 変換を施す。この変換によって現れる継続は $a \rightarrow a$ 型である。この型 $a \rightarrow a$ の名前を $k2$ とする。変換したプログラムが図 8 である。

4.3 非関数化

CPS 変換したことにより新たに現れた $a \rightarrow a$ 型の匿名関数を非関数化する。非関数化によって型 $k2$ の定義は図 9 に、ステップ関数は図 10 に変換される。

この非関数化によって、引数 k と引数 $k2$ からコンテキスト全体の情報が得られるようになった。?? 節で示した例について比較する。stepper に入力プログラム `((fun a -> a) (with handler {return x -> x, a(x; k) -> x} handle ((fun b -> b) (a (fun c -> c))) (fun d -> d)))` を表す構文木を渡して実行を始めた場合、`(a (fun c -> c))` を表す構文木を関数 `eval` に渡して実行を始める際の継続 k は ?? 節と同様に `FApp2 (Fun ("b", Var "b"), FApp1 (Fun ("d", Var "d")))` である。そして継続 $k2$ は `GHandle ()` 具体的な k の構造の例を示す。図 7 の関数 stepper に入力プログラム `((fun a -> a) (with handler {return x -> x, a(x; k) -> x} handle ((fun b -> b) (a (fun c -> c))) (fun d -> d)))` を表す構文木を渡して実行を始めた場合、`(a (fun c -> c))` を関数 `eval` に渡して実行を始める際の継続は `FApp2 (Fun ("b", Var "b"), FApp1 (Fun ("d", Var "d")))` である。これは式 `(a (fun c -> c))` のコンテキスト `((fun a -> a) (with handler {return x -> x, a(x; k) -> x} handle ((fun b -> b) [.]) (fun d -> d)))` のうち、`handle` の内側に対応している。`handle` から外側が継続に含まれないのは、関数 `eval` で `with h handle e` の `e` の実行の再帰呼び出し時に初期継続を表す `FId` を渡しているためである。コンテキスト全体に対応した継続を得るために、この後の変換をさらに施す。

4.4 出力

4.3 節までの変換によって、コンテキストの情報を引数に保持するインタプリタ関数を得ることができた。この情報を用いて簡約前後のプログラムを出力するように、図 10 のインタプリタの簡約が起こる部分に副作用を足すとステップが得られる。図 11 が副作用を足した後の関数 `apply_in` と `apply_handler` であり、他の関数は簡約している部分が無いので図 10 と変わらない。

ステップ表示では継続値の内容も見えるようにしたいので、継続を文字列で表す必要がある。ここでは継続を関数 `fun x -> e` のように `fun x => e` と表すこととする。すると各継続が仮引数名を持つ必要があるので構文木に追加する (図 12)。新しい継続値を作る時に、プログラム中で使われていない変数名を生成する関数 `gen_var_name` を利用して仮引数を定めている。

関数 `memo : e -> e -> (k * k2) -> unit` は、簡約基とその簡約後の式と簡約時のコンテキストを受け取って、簡約前のプログラムと簡約後のプログラムをそれぞれ再構成して出力する。

図 11 で `memo` の引数に渡している `redex` および `reduct` は、以下に示すこの言語の small-step の実行規則の簡約前後の式に対応する。

$$\begin{array}{c}
 (h = \text{handler } \{\text{return } x \rightarrow e0, \text{op1}(x; k) \rightarrow e1, \dots, \text{opn}(x; k) \rightarrow en\}) \\
 \hline
 \frac{}{(\text{fun } x \rightarrow e) \ v \Downarrow e[v/x]} \text{ (AppFun)} \quad \frac{}{(\text{fun } x \Rightarrow F[x]) \ v \Downarrow F[v]} \text{ (AppCont)} \\
 \hline
 \frac{}{\text{with } h \text{ handle } v \Downarrow e0[v/x]} \text{ (Return)} \quad \frac{?}{\text{with } h \text{ handle } e \Downarrow e0[v/x]} (?)
 \end{array}$$

```

(* CPS インタプリタを非関数化して CPS 変換した関数 *)
let rec eval (exp : e) (k : k) (k2 : k2) : a = match exp with
| Val (v) -> apply_in k v k2
| App (e1, e2) -> eval e2 (FApp2 (e1, k)) k2
| Op (name, e) -> eval e (FOp (name, k)) k2
| With (h, e) ->
    eval e FId (fun a -> apply_handler k h a k2) (* GHandle に変換される関数 *)

(* handle 節内の継続を適用する関数 *)
and apply_in (k : k) (v : v) (k2 : k2) : a = match k with
| FId -> k2 (Return v) (* handle 節の外の継続を適用 *)
| FApp2 (e1, k) -> let v2 = v in
    eval e1 (FApp1 (v2, k)) k2
| FApp1 (v2, k) -> let v1 = v in
    (match v1 with
    | Fun (x, e) ->
        let reduct = subst e [(x, v2)] in
        eval reduct k k2
    | Cont (k') ->
        apply_in (k' k) v2 k2
    | _ -> failwith "type error")
| FOp (name, k) -> k2 (OpCall (name, v, k))
| FCall (k'', h, k') ->
    apply_in k' v (fun a -> apply_handler k'' h a k2) (* GHandle に変換される関数 *)

(* handle 節内の実行結果をハンドラで処理する関数 *)
and apply_handler (k : k) (h : h) (a : a) (k2 : k2) : a = match a with
| Return v ->
    (match h with {return = (x, e)} ->
    let reduct = subst e [(x, v)] in
    eval reduct k k2)
| OpCall (name, v, k') ->
    (match search_op name h with
    | None ->
        k2 (OpCall (name, v, FCall (k, h, k'))) (* 外の継続を適用 *)
    | Some (x, y, e) ->
        let cont_value = Cont (fun k -> FCall (k, h, k')) in
        let reduct = subst e [(x, v); (y, cont_value)] in
        eval reduct k k2)

(* 初期継続を渡して実行を始める *)
let stepper (e : e) : a = eval e FId (fun a -> a) (* GId に変換される関数 *)

```

図 8. CPS インタプリタを非関数化して CPS 変換したプログラム

```

type k2 = GId
      | GHandle of k * h * k2

```

図 9. 2 回目の非関数化後の継続の型

5 他の言語への対応

3 節で示した algebraic effects を含む言語の CPS インタプリタをステップパにするには、非関数化、CPS 変換、非関数化が必要だったが、他のいくつかの言語についても同様にインタプリタを変換することでステップパを導出することを試みた。それぞれの言語のステップパ導出について説明する。

5.1 Multicore OCaml

Multicore OCaml は、OCaml の構文に algebraic effects を追加した構文を持つ。4 節で得られたステップパをもとにして、Multicore OCaml の algebraic effects を含む一部の構文を対象にしたステップパを実装した。3 節で定義した言語では `with handler {return x -> er, op1(x; k) -> e1, ..., opn(x; k) -> en} handle e` という構文でオペレーションを定義していたのに対し、Multicore OCaml では `try e with effect (op1 x) k -> e1 | ... | effect (opn x) k -> en` となる。この `with` 以下のパターンの中には例外のパターンも含めることができる。また、オペレーション呼び出しは `perform (opi e)` で行い、継続 `k` に値 `v` を渡して実行を再開するには `continue k v` と書く。このような構文の違いはあるものの、簡約のされかたは 3 節で定めた言語のインタプリタと同様なので、インタプリタ関数を用意できれば変換によってステップパが導出できる。

5.2 shift/reset

shift/reset は algebraic effects と同様に限定継続を変数に束縛して利用することができる機能である。4 節で行ったのと全く同様に、CPS インタプリタを非関数化、CPS 変換、非関数化して出力関数を挿入したらステップパが得られた。

5.3 try-with

try-with は、algebraic effects や shift/reset が限定継続を変数に束縛するのと違って、例外が起こされたときに限定継続を捨てるという機能である。よって継続を表す値は現れないので、インタプリタを CPS で書く必要は無い。Direct style でインタプリタを書いた場合、最初に CPS 変換をすることで、CPS インタプリタと同様の変換によってステップパが導出できた。最初から CPS インタプリタを書いていたならば 4 節と同様の手順になる。

5.4 型無し λ 計算

型無し λ 計算の DS インタプリタは、CPS 変換して非関数化したら全てのコンテキストを引数に保持するインタプリタになり、出力関数を入れるのみでステップパを作ることができた。これは、継続を区切って一部を捨てたり束縛したりするという操作が無いためだと考えられる。

6 関連研究

[6] [4] [5] [1] [8]

```

(* CPS インタプリタを非関数化して CPS 変換して非関数化した関数 *)
let rec eval (exp : e) (k : k) (k2 : k2) : a = match exp with
| Val (v) -> apply_in k v k2
| App (e1, e2) -> eval e2 (FApp2 (e1, k)) k2
| Op (name, e) -> eval e (FOp (name, k)) k2
| With (h, e) -> eval e FId (GHandle (k, h, k2))

(* handle 節内の継続を適用する関数 *)
and apply_in (k : k) (v : v) (k2 : k2) : a = match k with
| FId -> apply_out k2 (Return v)
| FApp2 (e1, k) -> let v2 = v in
  eval e1 (FApp1 (v2, k)) k2
| FApp1 (v2, k) -> let v1 = v in
  (match v1 with
  | Fun (x, e) ->
    let reduct = subst e [(x, v2)] in
    eval reduct k k2
  | Cont (k') ->
    apply_in (k' k) v2 k2
  | _ -> failwith "type error")
| FOp (name, k) -> apply_out k2 (OpCall (name, v, k))
| FCall (k_last, h, k') -> apply_in k' v (GHandle (k_last, h, k2))

(* 全体の継続を適用する関数 *)
and apply_out (k2 : k2) (a : a) : a = match k2 with
| GId -> a
| GHandle (k, h, k2) -> apply_handler k h a k2

(* handle 節内の実行結果をハンドラで処理する関数 *)
and apply_handler (k_last : k) (h : h) (a : a) (k2 : k2) : a = match a with
| Return v -> (match h with {return = (x, e)} ->
  let reduct = subst e [(x, v)] in
  eval reduct k_last k2)
| OpCall (name, v, k') -> (match search_op name h with
| None -> apply_out k2 (OpCall (name, v, FCall (k_last, h, k')))
| Some (x, k, e) ->
  let cont_value = Cont (fun k_last -> FCall (k_last, h, k')) in
  let reduct = subst e [(x, v); (k, cont_value)] in
  eval reduct k_last k2)

(* 初期継続を渡して実行を始める *)
let stepper (e : e) : a = eval e FId GId

```

図 10. CPS インタプリタを非関数化して CPS 変換して非関数化したプログラム

```

(* handle 節内の継続を適用する関数 *)
and apply_in (k : k) (v : v) (k2 : k2) : a = match k with
| FId -> apply_out k2 (Return v)
| FApp2 (e1, k) -> let v2 = v in
  eval e1 (FApp1 (v2, k)) k2
| FApp1 (v2, k) -> let v1 = v in
  (match v1 with
  | Fun (x, e) ->
    let redex = App (Val v1, Val v2) in (* (fun x -> e) v2 *)
    let reduct = subst e [(x, v2)] in (* e[v2/x] *)
    memo redex reduct (k, k2);
    eval reduct k k2
  | Cont (x, k') ->
    let redex = App (Val v1, Val v2) in (* k' v2 *)
    let reduct = plug_in_handle (Val v2) (k' FId) in (* k'[v2] *)
    memo redex reduct (k, k2);
    apply_in (k' k) v2 k2
  | _ -> failwith "type error")
| FOp (name, k) -> apply_out k2 (OpCall (name, v, k))
| FCall (k_last, h, k') ->
  apply_in k' v (GHandle (k_last, h, k2))

(* handle 節内の実行結果をハンドラで処理する関数 *)
and apply_handler (k : k) (h : h) (a : a) (k2 : k2) : a = match a with
| Return v ->
  (match h with {return = (x, e)} ->
    let redex = With (h, Val v) in (* with handler{return x -> e} handle v *)
    let reduct = (subst e [(x, v)]) in (* e[v/x] *)
    memo redex reduct (k, k2);
    eval reduct k k2)
| OpCall (name, v, k') ->
  (match search_op name h with
  | None -> apply_out k2 (OpCall (name, v, FCall (k, h, k'))))
  | Some (x, y, e) ->
    let redex = (* with handler {name(x; y) -> e} handle k'[(name v)] *)
      With (h, plug_in_handle (Op (name, Val v)) k') in
    let new_var = gen_var_name () in
    let cont_value =
      Cont (new_var, fun k -> FCall (k, h, k')) in
    let reduct = (* e[v/x, k[with h handle k']/y] *)
      subst e [(x, v); (y, cont_value)] in
    memo redex reduct (k, k2);
    eval reduct k k2)

```

図 11. 変換の後、出力関数を足して得られるステップ

```

type v = Var of string
       | Fun of string * e
       | Cont of e * (k -> k)

```

図 12. 継続を文字列で表すために変更した値の型

7 まとめと今後の課題

ステップを実装するためには、コンテキストの情報を保持しながら部分式を再帰的に実行するインタプリタを作ればよい。以前の研究 [3] では言語ごとにコンテキストを表すデータ型を考えた上でインタプリタに実行の流れに従った新しい引数を付け足す作業が必要だったが、本研究では通常のインタプリタを CPS 変換および非関数化するという機械的な操作のみでコンテキストの型およびコンテキストの情報を保持するインタプリタ関数を導出した。

その方法で、継続を明示的に扱える algebraic effects を含む言語に対するステップを実装し、それをもとにして algebraic effects を含む言語 multicore OCaml の一部の構文のステップも実装した。また、他の例外処理機能である try-with や shift/reset を含む言語についても同様の変換ができることを確認した。

今後は、より多くの言語機能についてステップを導出する方法を探求していきたい。

参考文献

- [1] Dariusz Biernacki, Maciej Piróg, Piotr Polesiuk, and Filip Sieczkowski. Handle with care: Relational interpretation of algebraic effects and handlers. *Proc. ACM Program. Lang.*, Vol. 2, No. POPL, December 2017.
- [2] John Clements, Matthew Flatt, and Matthias Felleisen. Modeling an algebraic stepper. In *European symposium on programming*, pp. 320–334. Springer, 2001.
- [3] Tsukino Furukawa, Youyou Cong, and Kenichi Asai. Stepping OCaml. In *Proceedings Seventh International Workshop on Trends in Functional Programming in Education*, Chalmers University, Gothenburg, Sweden, 14th June 2018, Vol. 295 of *Electronic Proceedings in Theoretical Computer Science*, pp. 17–34, 2019.
- [4] Daniel Hillerström and Sam Lindley. Shallow effect handlers. In Sukeyoung Ryu, editor, *Programming Languages and Systems*, pp. 415–435, Cham, 2018. Springer International Publishing.
- [5] Daniel Hillerström, Sam Lindley, Robert Atkey, and KC Sivaramakrishnan. Continuation passing style for effect handlers. In Dale Miller, editor, *2nd International Conference on Formal Structures for Computation and Deduction (FSCD 2017)*, Leibniz International Proceedings in Informatics (LIPIcs), pp. 18:1–18:19, 9 2017.
- [6] Ohad Kammar, Sam Lindley, and Nicolas Oury. Handlers in action. In *Proceedings of the 18th ACM SIGPLAN International Conference on Functional Programming, ICFP '13*, p. 145158, New York, NY, USA, 2013. Association for Computing Machinery.
- [7] G.D. Plotkin. Call-by-name, call-by-value and the λ -calculus. *Theoretical Computer Science*, Vol. 1, No. 2, pp. 125 – 159, 1975.
- [8] Matija Pretnar. An introduction to algebraic effects and handlers. invited tutorial paper. *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, Vol. 319, pp. 19 – 35, 2015. The 31st Conference on the Mathematical Foundations of Programming Semantics (MFPS XXXI).
- [9] John C. Reynolds. Definitional interpreters for higher-order programming languages. *Higher-Order and Symbolic Computation*, Vol. 11, No. 4, pp. 363–397, Dec 1998.
- [10] John Whittington and Tom Ridge. Direct interpretation of functional programs for debugging. In Sam Lindley and Gabriel Scherer, editors, *Proceedings ML Family / OCaml Users and Developers workshops*, Oxford, UK, 7th September 2017, Vol. 294 of *Electronic Proceedings in Theoretical Computer Science*, pp. 41–73. Open Publishing Association, 2019.