プログラム言語論

亀山幸義

筑波大学 情報科学類

No. 3

C 言語のプログラム

```
#include <stdio.h>;
int x, *s;
int data[100];
 int sort (int *s) {
   int y;
   ...x...
 }
 int main () {
   int x;
   ... sort( ..) ...
    {int x = 10; ...}
 }
```

```
#include <stdio.h>;
int x, *s;
int data[100];
[ int sort (int *s) {
    int y;
    ...x...
  } ]
[ int main () {
    int x;
    ... sort( ..) ...
    [ {int x = 10; ...} ]
  } ]
```

(正確には，1つのブロックは，{ から } まで)

ブロック構造

- ALGOL 以来，多くのプログラム言語が採用.
- プログラムのテキスト (文面) に対する概念.
- 変数の有効範囲 (スコープ) と密接に関連.
- 入れ子構造をなす.

入れ子 (nest)

- 「2つのブロックが、共通部分をもてば、必ず、片方が他方を包含する。

ML 言語のプログラム

```
let rec eval exp =
   let apply_binop ope exp1 exp2 =
        ...
   in
      match exp with
      | ...
      | Plus(e1,e2)  -> apply_binop (+) e1 e2
      | Times(e1,e2)  -> apply_binop ( * ) e1 e2
```

C 言語と違い、入れ子になった関数定義が許される。(eval_exp の中で、apply_binop が定義されている。)

ブロック構造言語の実行方式

- 1つのブロックが、実行時に何度も呼ばれることがある。
- ブロックの実行開始と実行終了は、Last-in, First-Out (First-in, Last-Out とも言う)。
- スタック

これ以降では、スタックに基づく形式意味論は、省略して、スタックに基づく実行方式を学ぶ。

プログラム実行時のメモリの状況 (2)

- Register (CPU のレジスタ)
- Program Counter (コード領域を指す変数)
- Code (プログラムのコードを格納する領域)
- Environment Pointer (スタックを指す変数)
- Data:
  - Stack (スタック)
  - Heap (ヒープ)

プログラムスタック (あるいは，環境スタック)

- ブロック構造を持つプログラム言語の処理系で使用.
- ブロックに局所的な変数たちの値を格納.

```
int f (int y) {
 int z = 10;                          ----
 return y+z;                          z=10
}                                     y=11
main () {                       ----  ----  ----
  int x = 10;                   x=10  x=10  x=10
  x = f(x+1);             ----  ----  ----  ---- ----
}
```


スタックフレーム

スタックフレーム (stack frame, activation record)

- スタックに積まれる、ひとまとまりのデータ。
- スタック全体は，0 個以上のスタックフレームから構成.
- 典型的なスタックフレームの中身 (関数ブロックの場合)
  - 局所変数 (関数の引数，関数で定義された変数) の値
  - 計算の途中結果
  - 関数の戻り先アドレス (コード領域の番地)
  - 関数が返す値
  - 1つ前のスタックフレームへのポインタ (Control link)
  - 値を参照する変数を探すためのリンク (Access link)

演習で使う処理系では、`show` 関数により、「スタックフレームごとの局所変数とその値」が表示される。

関数呼出しの意味論 (1)

```
int f(int x, bool y) {int z; ...}
```

環境 σ のもとで $f(e_1, e_2)$ が呼ばれたときの処理：

- 引数 e_1, e_2 を現在の環境 σ で計算する．
- それらの結果を v_1, v_2 とする．
- 環境スタックに新しいスタックフレームを追加する．
- Environment Pointer が新しいスタックフレームを指すようにする．
- 新しいスタックフレームに以下の値を格納:
  - Control link: 1 つ前のスタックフレームへのポインタ.
  - Access link: 値を参照する変数を探すためのリンク.
  - 戻り先アドレス: 関数の計算終了後に戻ってくるべきコード領域の番地.
  - 戻り値を格納するスペース.
  - 関数の実引数 v_1, v_2
  - 関数の局所変数 z を格納するスペース

関数呼出しの意味論

```
int f(int x, bool y) {int z; ...}
```

関数呼び出し $f(e_1, e_2)$ の中で、`return` e; が実行されたときの処理:

- その時点での状態 σ のもとで e を計算し，その値をスタックフレーム内の「返り値を格納するスペース」にいれる．
- スタックフレームに保存しておいた戻りアドレスに飛ぶ．(Program Counter にそのアドレスをいれる．)
- 現在のスタックフレームをはずす．(Control link をたどり，Environment Pointer が 1 つ前のスタックフレームを指すようにする．)
- (局所変数はすべて失われる．)

まとめ

- プログラムの意味論
- ブロック構造をもつプログラム言語
- スタックを用いたインタープリタ
- 関数呼び出しの意味論

動的束縛と静的束縛

```
int x;
int g (int y) {
  return (x + y);
}
int f () {
  int x;
  x = 10;
  return (g(20));
}
int main () {
  x = 5;
  print f();
}
```

問題: `main` から `f` を呼び、そこから `g` を呼んでいる。関数 `g` の中で参照されている変数 `x` は、その直前の `f` で定義されたものか、大域変数か？

- 大域変数⇒静的束縛 (static binding)

動的束縛と静的束縛

束縛 (binding) = 変数の宣言と使用の間の関係。

- 静的束縛: プログラムの文面上で決まる束縛関係。
  - プログラム上で、変数宣言が有効な範囲 (スコープ) が定まる。
  - x に対する変数宣言は、それが有効なスコープ内の変数 x の使用を束縛する。
  - ただし、「入れ子」の時は、最も内側が有効。
- 動的束縛: プログラムの実行順序で決まる束縛関係。
  - 実行時の関数呼び出しの順序により、有効な時間が定まる。
  - x に対する変数宣言は、それを含む関数等が呼出されてから終了するまでの時間、有効。
  - 変数 x の使用は、その時間に有効な変数宣言により束縛される。
  - ただし、「入れ子」の時は、最後 (最近) のものが有効。

動的束縛と静的束縛の比較

- FUNARG 問題: 昔の Lisp 言語では、インタープリタでは動的束縛、コンパイラでは静的束縛であり、同じプログラムでも意味が異なっていた。
- 現代の多くのプログラム言語の変数束縛は、静的束縛。(人間が見てわかりやすい。コンパイラにとってもやりやすい。)
- 現代でも、意図的に動的束縛にしている事がある。
  - 例: 「標準出力先」を一時的に変更する。
  - 例: オブジェクト指向言語のメソッド名参照は、一種の動的束縛。

様々なプログラム言語

入れ子の関数定義が許される言語:

Scheme 言語:

```
(define (fun1 x)
  (define (fun2 y) (+ x y))
  (define (fun3 x) (fun2 10))
  (fun3 2))
(fun1 5)
```

OCaml 言語:

```
let fun1 x =
  let fun2 y = x + y in
  let fun3 x = fun2 10 in
     fun3 2
in
  fun1 5
```

どちらも静的束縛:上記の計算の答は 15。

静的束縛と動的束縛の実現

- 動的束縛: プログラム実行中に、変数参照があったとき (変数の値を知りたいとき)、Control link を逆順にたどれば良い。
- 静的束縛: Control link では役に立たない.
  - スタック上の位置関係ではなく、プログラムの文面上で「現在のブロックの 1 つ外にあるブロック」が何かを知りたい.
  - これは,「現在のスタックフレームの 1 つ前のスタックフレーム」とは必ずしも一致しない.
  - Control link 以外の情報が必要 ⇒ Access link.

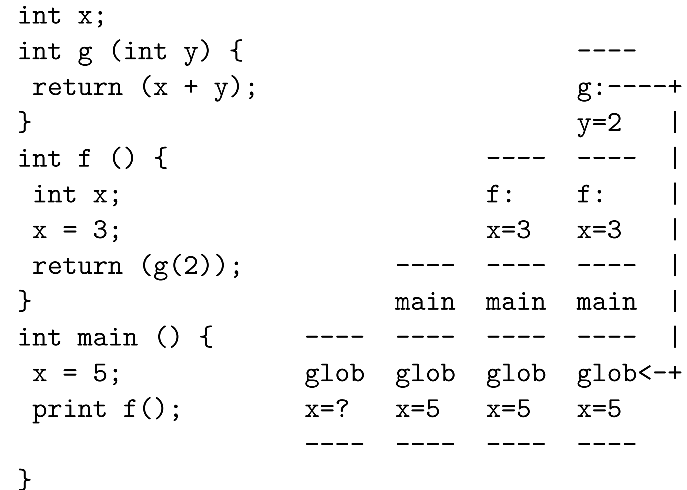
Access Link による静的束縛の実現

- Control link: 1 つ手前のスタックフレームへのポインタ.
- Access link: は文面上で「1 つ外」のブロックに対応するスタックフレームへのポインタ。

(詳細は、例により説明。)

Access Link による静的束縛の実現

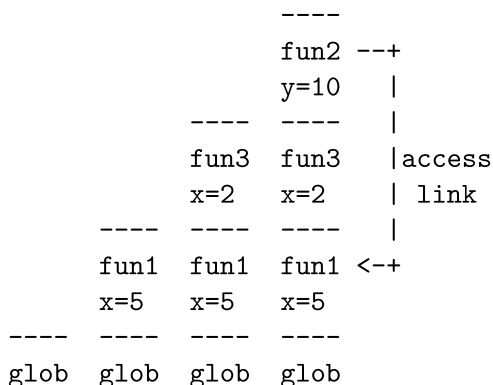
```
int x;
int g (int y) {
 return (x + y);
}
int f () {
 int x;
 x = 3;
 return (g(2));
}
int main () {
 x = 5;
 print f();
}
```



C 言語の場合、実装は比較的容易 (入れ子の関数定義を許さないため)。

Access Link による静的束縛の実現

```
(define (fun1 x)
  (define (fun2 y) (+ x y))
  (define (fun3 x) (fun2 10))
  (fun3 2))
(fun1 5)
```



注: 関数型言語の処理系は、通常は「関数クロージャ」(後述) を生成する

評価順序とは

課題から:

- MiniC 処理系の各モードについて以下の事を調べよ。
  - 静的束縛であるか、動的束縛であるか。
  - 複数の引数がある関数呼出しでは、左の引数を最初に計算するか最後か。

評価順序 (evaluation order, 計算の順序): 1 つのプログラムにおいて、どの部分 (部分プログラム) から計算するか。
評価戦略 (evaluation strategy) とも言う。

評価順序-例 1

式 $((1+2)*(3+4))*0$ の計算方式はいろいろある。

- 最初に $(1+2)$ から計算する。
- 最初に $(3+4)$ から計算する。
- 最初に $(1+2)$ と $(3+4)$ を 2 つ同時に計算する。
- 最初に $\cdots * 0$ から計算する。

評価順序-例 2

```
int fun1 (int x) {
   return x+x;
}
main () {
   print (fun1 (1+2));
}
```

- `(1+2)` から計算して 3 を得て、次に `fun1 3` を計算して、6 を得る。(値呼び計算)
- 式 1+2 のまま、`fun1` の仮引数 x に代入して、`return (1+2)+(1+2)` を得て、最終的に 6 を返す。(名前呼び計算)

値呼び計算 call by value

関数呼出し $f(e)$ の計算 (静的束縛言語と仮定)。

- まず，e を計算して，値 v を得る.
- f が仮引数 x を取る関数のとき、環境 σ に $x=v$ を追加.
- その環境で f の本体を計算して，その結果を全体の答えとする.

```
int fun1 (int x) { return x+x; }
int fun2 (int x) { return 0; }
```

という定義のもとで、

- `fun1(power(2,10))` の計算では、「2 の 10 乗」は 1 回だけ計算される。
- `fun2(power(2,10))` の計算では、「2 の 10 乗」は 1 回だけ計算される。

多くのプログラム言語 (C, Java, Scheme, ML 等) の関数呼出しが値呼び。

名前呼び計算 call by name

関数呼出し $f(e)$ の計算 (静的束縛言語と仮定)。

- f が仮引数 x を取る関数のとき、環境 σ に $x=e$ を追加.
- その環境で f の本体を計算して，その結果を全体の答えとする.

```
int fun1 (int x) { return x+x; }
int fun2 (int x) { return 0; }
```

という定義のもとで、

- `fun1(power(2,10))` の計算では、「2 の 10 乗」は 2 回計算される。
- `fun2(power(2,10))` の計算では、「2 の 10 乗」は 0 回計算される。

C 言語のマクロ展開は、名前呼びの一種と考えられる。

必要呼び計算 call by need

値呼びと名前呼びの「良いとこどり」: 名前呼びと同様に計算するが、引数の値を 1 回計算したらその結果を覚えておいて、2 回目以降の計算で使う。

- `fun1(power(2,10))` の計算では、「2 の 10 乗」は 1 回計算される。
- `fun2(power(2,10))` の計算では、「2 の 10 乗」は 0 回計算される。

ある種のプログラム言語 (Haskell 等) の関数呼出しは必要呼び。
cf. Java の Just-in-Time Compiler: 各クラスは、それが必要になるまで、compile しない。ただし 1 度 compile したら、2 回目以降の呼出しでは compiled code を使う。

その他の戦略

戦略はいろいろあり得る.

- 並行戦略: 同時に計算可能な複数の部分をすべて同時に計算する戦略.
  - 例: $(1+2)*(3+4) \to 3*7$.
- 非決定的な (non-deterministic) 戦略: 「次の状態」が必ずしも一意的でない.
  - 例: $(1+2)*(3+4) \to (1+2)*7$.
  - 例: $(1+2)*(3+4) \to 3*(3+4)$.
  - $\leftrightarrow$ 決定的な戦略: 次の状態が常に一意的に決まる戦略.
- cf. 計算結果が「決定的」: 途中の段階では複数の状態に分岐することがあるが, 最終的な計算結果が一意的.

どの戦略が「最善」か？

- 演算の回数 (足し算など) を行なう回数を最小にする戦略 (関数呼び出しそのものの計算時間は考えない) ⇒ 最善は必要呼び.
- 実装においては, 変数に束縛されるものが値に限定されている方が, 一般の式を許す方式より, 効率がよくなる. ⇒ 最善は値呼.
- 「なるべく有限時間で停止する」戦略は, 名前呼びと必要呼び.

多くのプログラム言語の関数呼出しは, 値呼びを採用. ただし, プログラム変換などの言語処理においては, 必要呼び (や名前呼び) も採用されることがある.

C 言語のマクロと関数

```
#define foo(x) (x+x)
int goo(int x) {
  return x+x;
}
int main () {
  int y = 0;
  y = foo(power(2,10));
  y = goo(power(2,10));
}
```

マクロ展開は、名前呼びと見なせる。関数呼び出しは、値呼びである。

まとめ

- 静的束縛と動的束縛
- Access Link による静的束縛の実装方式
- 評価順序

Chapter 4 「名前と環境」のまとめ (1)

いくつかのキーワード:

- 名前 (name): プログラム言語でオブジェクトを指し示すために使う. 例: 変数名, 関数名, 型名など.
- オブジェクト (正確には, denotable object): 名前を付けられるもの. プログラム言語ごとに定まる. 例: C 言語では, 整数, 文字列, 関数, ロケーション (アドレス), 型
- 束縛 (binding): 名前とオブジェクトの対応関係

束縛のタイミング:

- 言語を設計した時. 例: `int` が整数型を表す.
- プログラムを書いた時. 例: `x` が整数型の変数を表す.
- コンパイル時. 例: 大域変数 `x` がメモリ上で YYY というロケーションを与えられる.
- 実行時. 例: 局所変数 `x` がメモリ上で ZZZ というロケーションを与えられる.

実行時を動的 (dynamic) と言い, それより前 (すべて) を静的 (static) と言う.

Chapter 4 「名前と環境」のまとめ (2)

環境 (environment):

- 名前とオブジェクトの対応関係のひとまとまりで, 実行の各瞬間で定まるもの.
- 「宣言」(declaration) によって, 名前とオブジェクトの対応が作られる.

ブロック (block):

- プログラムのテキスト (字面) 上のまとまり.
- ALGOL60 言語で用いられ, 現代の多くの言語で採用.
- 手続きや関数に対応するブロックと, それ以外のブロック (関数内での小さなブロックなど) がある.
- ブロックは「入れ子 (nest)」構造を持つ. (2 つの異なるブロックが一部だけ共有することはない.)

ブロック構造言語における環境:

- 局所環境; 現在実行されているブロックで宣言された束縛の集まり.
- 非局所環境; 現在のブロックより外で宣言された束縛の集まり.
- 大域環境; プログラム実行当初に存在していた束縛の集まり.

Chapter 4 「名前と環境」のまとめ (3)

Scope Rule (環境と束縛のルール); 非局所環境の選択の方法を決める.

- 静的スコープ (static scope, lexical scope; 静的束縛); プログラムの字面上 (ブロックの位置関係) で, スコープが決まる.
- 動的スコープ (dynamic scope; 動的束縛); プログラムを実行した順番で, スコープが決まる.

多くのプログラム言語が静的スコープを採用している. 変数束縛以外では, 動的スコープが有効な場面もある.

Chapter 5 「メモリ管理」のまとめ (1)

Stack frame または Activation Record

- 1 つのブロックの 1 回の呼び出しに対応した ひとまとまりのデータ; スタックに積まれる。
- 中身; 局所変数 (を格納するスペース)、計算の途中結果、関数の戻り番地、関数の計算結果、Control Link, Access Link, ...

(実行時) スタック

- stack frame を要素とするスタック.
- ブロック構造言語の実行に使用.

Chapter 5 「メモリ管理」のまとめ (2)

Control link (or dynamic chain pointer):

- 「1 つ前に呼び出された (スタックに積まれた) スタックフレーム」へのポインタ。
- 現在実行中のブロックの実行終了後に、スタックフレームを 1 つ捨てるために使う。

Access link (or static chain pointer):

- 「プログラムの文面上で、1 つ外のブロックに対応するスタックフレーム」へのポインタ。
- static scope ルールのもとで、非局所変数の値を lookup するために使う。
- “display” 技法で効率良く実装。(Gabbrielli and Martini, pp.109-111)

Control Link/Access Link の具体的な動作については、miniC 言語演習等で学習してほしい. (もしくは Gabbrielli and Martini, Chapter 5)