プログラム言語論

亀山幸義

筑波大学コンピュータサイエンス専攻

筑波大学 情報科学類 講義

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)
- 直前の `f` のもの⇒動的束縛 (dynamic 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
     fun2 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。)

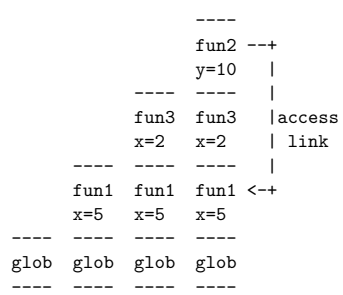
Access Link による静的束縛の実現

```
int x;
int g (int y) {                      ----
 return (x + y);                     g:----+
}                                    y=2   |
int f () {                    ----   ----  |
 int x;                       f:     f:    |
 x = 3;                       x=3    x=3   |
 return (g(2));          ----  ----   ----  |
}                        main  main   main  |
int main () {      ----  ----  ----   ----  |
 x = 5;            glob  glob  glob   glob<-+
 print f();        x=?   x=5   x=5    x=5
                   ----  ----  ----   ----
}
```

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) を生成することによって静的束縛を実現する。

評価順序とは

先週の課題から:

- 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。

どの戦略が「最善」か？

- 引数の計算をなるべく繰返さない計算方式が優秀とすれば⇒必要呼びが最善の戦略。
- 実装する際、引数を (値ではなく) 式のまま保存しておく必要がある。⇒名前呼びや必要呼びは必ずしも効率良く実装できない。
- 実用的なプログラム言語の多くにおいて、基本的な関数呼び出しは値呼び。

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
- 3 つの評価順序