

多段階 let 挿入を行うコード生成言語の 設計

大石純平

筑波大学 大学院
プログラム論理研究室

2016/7/12

アウトライン

- ① 概要
- ② 研究の背景
- ③ 研究の目的
- ④ 研究の内容
- ⑤ まとめと今後の課題

アウトライン

- ① 概要
- ② 研究の背景
- ③ 研究の目的
- ④ 研究の内容
- ⑤ まとめと今後の課題

プログラムを生成するプログラミング言語 (=コード生成言語)
の安全性を保証する研究

プログラムを生成するプログラミング言語 (= **コード生成言語**)
の安全性を保証する研究

- 効率的なコードの生成

プログラムを生成するプログラミング言語 (= **コード生成言語**)
の安全性を保証する研究

- 効率的なコードの生成
- 安全性の保証

プログラムを生成するプログラミング言語 (=コード生成言語) の安全性を保証する研究

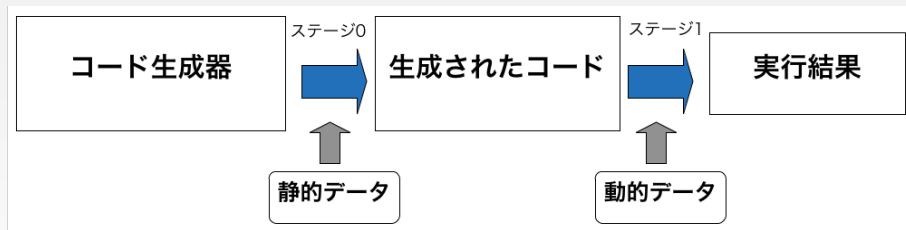
- 効率的なコードの生成
- 安全性の保証

⇒ 多段階 let 挿入を安全に扱うための型システムを構築

アウトライン

- ① 概要
- ② 研究の背景**
- ③ 研究の目的
- ④ 研究の内容
- ⑤ まとめと今後の課題

段階的計算 (Staged Computation)



- コード生成ステージとコード実行ステージ
- ⇒ 段階的計算をサポートするプログラム言語 ⇒ コード生成言語

power 関数のコード化

```
power  $x$   $n$  =  $x$                                 if  $n = 1$   
               $x * \text{power } x (n - 1)$             if  $n > 1$ 
```

power 関数のコード化

$\text{power } x \ n = x$	if $n = 1$
$x * \text{power } x \ (n - 1)$	if $n > 1$

$n = 8$ に特化したコードの生成を行う

$\text{gen_power } x \ 8 = x * x * x * x * x * x * x * x$

power 関数のコード化

$\text{power } x \ n = x$	if $n = 1$
$x * \text{power } x \ (n - 1)$	if $n > 1$

$n = 8$ に特化したコードの生成を行う

$\text{gen_power } x \ 8 = x * x * x * x * x * x * x * x$

$\text{gen_power } x \ 8$ は $\text{power } x \ 8$ より高速

- 関数呼び出しがない
- 条件式がない

コード生成の利点と課題

利点

- 「保守性・再利用性の高さ」と「実行性能の高さ」の両立

コード生成の利点と課題

利点

- 「保守性・再利用性の高さ」と「実行性能の高さ」の両立

課題

- パラメータに応じて、非常に多数のコードが生成される
- 生成したコードのデバッグが容易ではない

⇒ コード生成の前に安全性を保証したい

- コード生成プログラムが、安全なコードのみを生成する事を静的に保証
- 安全なコード: 構文, 型, 変数束縛が正しいプログラム

- コード生成プログラムが、安全なコードのみを生成する事を静的に保証
- 安全なコード: 構文, 型, 変数束縛が正しいプログラム

しかし多段階 `let` 挿入等を実現する計算エフェクトを含む場合のコード生成の安全性保証は研究途上

多段階 let 挿入

- 入れ子になった for ループなどを飛び越えたコード移動を許す仕組み
- ループ不変式の移動によって、効率的なコード生成に必要なプログラミング技法

多段階 let 挿入, let 挿入の例

```
for  $i = 0$  to  $n$  in  
  for  $j = 0$  to  $m$  in  
    let  $y = t$  in  
       $a[i][j] = b[i] + y$ 
```

多段階 let 挿入, let 挿入の例

```
for  $i = 0$  to  $n$  in  
  for  $j = 0$  to  $m$  in  
    let  $y = t$  in  
       $a[i][j] = b[i] + y$ 
```

多段階 let 挿入



```
let  $y = t$  in  
  for  $i = 0$  to  $n$  in  
    for  $j = 0$  to  $m$  in  
       $a[i][j] = b[i] + y$ 
```

— t が i にも j にも依存しない式

多段階 let 挿入, let 挿入の例

```
for  $i = 0$  to  $n$  in  
  for  $j = 0$  to  $m$  in  
    let  $y = t$  in  
       $a[i][j] = b[i] + y$ 
```

普通の let 挿入



```
for  $i = 0$  to  $n$  in  
  let  $y = t$  in  
    for  $j = 0$  to  $m$  in  
       $a[i][j] = b[i] + y$ 
```

— t が i にのみ依存し j には依存しない式

多段階 let 挿入, let 挿入の例

```
for  $i = 0$  to  $n$  in  
  for  $j = 0$  to  $m$  in  
    let  $y = t$  in  
       $a[i][j] = b[i] + y$ 
```

多段階 let 挿入でも let 挿入でもない



```
for  $i = 0$  to  $n$  in  
  for  $j = 0$  to  $m$  in  
    let  $y = t$  in  
       $a[i][j] = b[i] + y$ 
```

— t が i, j に依存した式

プログラミング言語におけるプログラムを制御するプリミティブ

- exception (例外): C++, Java, ML
- call/cc (第一級継続): Scheme, SML/NJ
- shift/reset (限定継続): Racket, Scala, OCaml
 - 1989 年以降多数研究がある
 - コード生成における let 挿入が実現可能
- shift0/reset0
 - 2011 年以降研究が活発化.
 - コード生成における多段階 let 挿入が可能

アウトライン

- ① 概要
- ② 研究の背景
- ③ 研究の目的**
- ④ 研究の内容
- ⑤ まとめと今後の課題

研究の目的

表現力と安全性を兼ね備えたコード生成言語の構築

- 表現力: 多段階 `let` 挿入, メモ化等の技法を表現
- 安全性: 生成されるコードの一定の性質を静的に検査

研究の目的

表現力と安全性を兼ね備えたコード生成言語の構築

- 表現力: 多段階 `let` 挿入, メモ化等の技法を表現
- 安全性: 生成されるコードの一定の性質を静的に検査

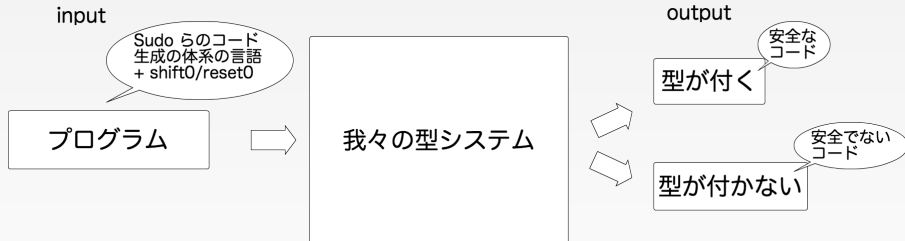
本研究: 簡潔で強力なコントロールオペレータに基づくコード生成体系の構築

- コントロールオペレータ `shift0/reset0` を利用し, `let` 挿入などのコード生成技法を表現
- 型システムを構築して型安全性を保証

アウトライン

- ① 概要
- ② 研究の背景
- ③ 研究の目的
- ④ 研究の内容**
- ⑤ まとめと今後の課題

本研究の手法



コード生成器と生成されるコード

コード生成器

```
cfor  $i = 0$  to  $n$  in  
  cfor  $j = 0$  to  $m$  in  
    clet  $y = t$  in  
       $(a[\underline{i}][\underline{j}] = b[\underline{i}] + y)$ 
```

⇒

生成されるコード

```
for  $i = 0$  to  $n$  in  
  for  $j = 0$  to  $m$  in  
    let  $y = t$  in  
       $a[i][j] = b[i] + y$ 
```

コード生成器と生成されるコード

コード生成器

```
... cfor  $i = 0$  to  $n$  in  
... cfor  $j = 0$  to  $m$  in  
... clet  $y = t$  in  
...  $(a[\underline{i}][\underline{j}] = b[\underline{i}] + y)$ 
```

⇒

生成されるコード

```
let  $y = t$  in  
  for  $i = 0$  to  $n$  in  
    for  $j = 0$  to  $m$  in  
       $a[i][j] = b[i] + y$ 
```

コード生成器

```
... cfor  $i = 0$  to  $n$  in  
  ... cfor  $j = 0$  to  $m$  in  
    ... clet  $y = t$  in  
      ...  $(a[\underline{i}][\underline{j}] = b[\underline{i}] + y)$ 
```

shift0/reset0 による多段階 let 挿入

コード生成器

```
reset0 cfor  $i = 0$  to  $n$  in  
  reset0 cfor  $j = 0$  to  $m$  in  
    shift0  $k_2 \rightarrow$  shift0  $k_1 \rightarrow$  clet  $y = t$  in  
       $k_1$  ( $k_2$  ( $a[\underline{i}][\underline{j}] = b[\underline{i}] + y$ ))
```

shift0/reset0 による多段階 let 挿入

コード生成器

```
reset0 cfor  $i = 0$  to  $n$  in  
  reset0 cfor  $j = 0$  to  $m$  in  
    shift0  $k_2 \rightarrow$  shift0  $k_1 \rightarrow$  clet  $y = t$  in  
       $k_1 (k_2 (a[\underline{i}][\underline{j}] = b[\underline{i}] + y))$ 
```

```
 $k_1 =$  cfor  $i = 0$  to  $n$  in  
 $k_2 =$  cfor  $j = 0$  to  $m$  in
```


コード生成器

clet $y = t$ in

k_1 (k_2 ($a[\underline{i}][\underline{j}] = b[\underline{i}] + y$))

$k_1 =$ cfor $i = 0$ to n in

$k_2 =$ cfor $j = 0$ to m in

生成されるコード

```
let  $y = t$  in  
  for  $i = 0$  to  $n$  in  
    for  $j = 0$  to  $m$  in  
       $a[i][j] = b[i] + y$ 
```

型が付く例/付かない例

コード生成器

```

$$e = \text{reset0 } \text{cfor } i = 0 \text{ to } n \text{ in}$$

$$\text{reset0 } \text{cfor } j = 0 \text{ to } m \text{ in}$$

$$\text{shift0 } k_2 \rightarrow \text{shift0 } k_1 \rightarrow \text{clet } y = t \text{ in}$$

$$k_1 (k_2 (a[i][j] = b[i] + y))$$

```

型が付く例/付かない例

コード生成器

```
e = reset0 cfor i = 0 to n in  
    reset0 cfor j = 0 to m in  
        shift0 k2 → shift0 k1 → clet y = t in  
            k1 (k2 (a[i][j] = b[i] + y))
```

生成されるコード



```
e  $\rightsquigarrow^*$  let y = a[i][j] in  
    for i = 0 to n in  
        for j = 0 to m in  
            a[i][j] = b[i] + y
```



```
e  $\rightsquigarrow^*$  let y = 7 in  
    for i = 0 to n in  
        for j = 0 to m in  
            a[i][j] = b[i] + y
```

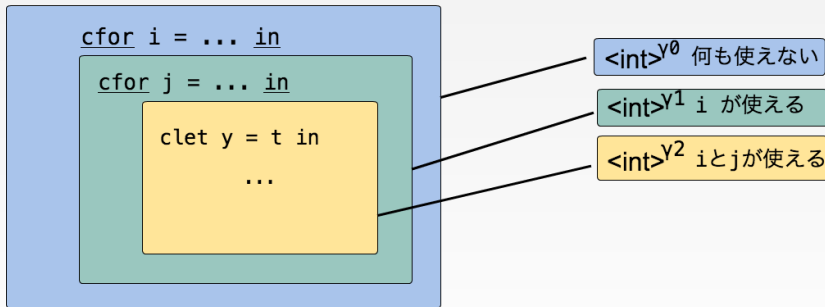
**安全なコードにのみ型をつける
にはどうすればよいか**

環境識別子 EC によるスコープ表現

[Taha+2003] [Sudo+2014]

コードレベルの変数スコープ

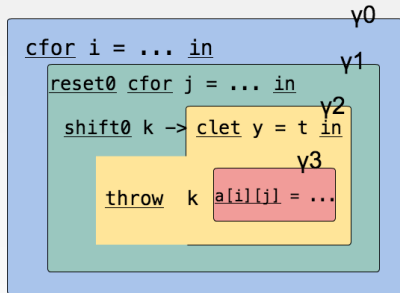
型によるスコープの表現



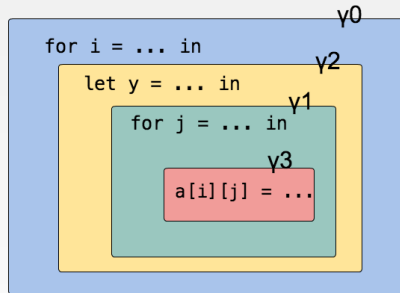
$\gamma_0 \longrightarrow \gamma_1 \longrightarrow \gamma_2$

γ_i ...Refined Environment Classifier

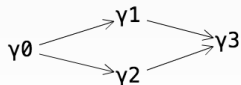
ECの洗練化（本研究）



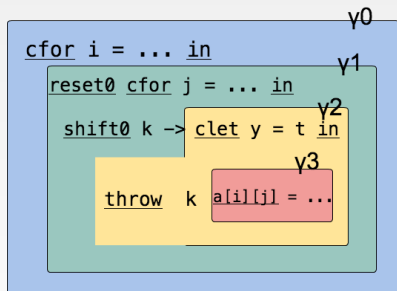
計算
 \Rightarrow



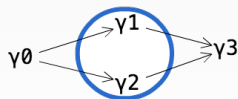
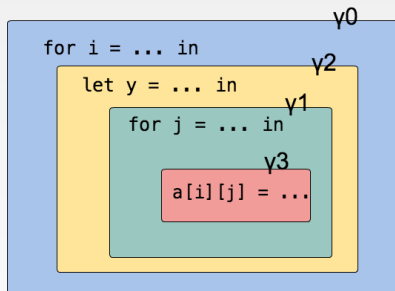
$y_0 \longrightarrow y_1 \longrightarrow y_2 \longrightarrow y_3$

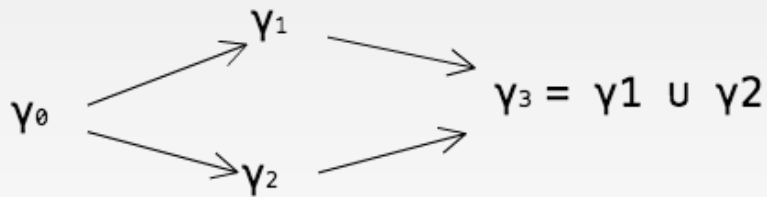


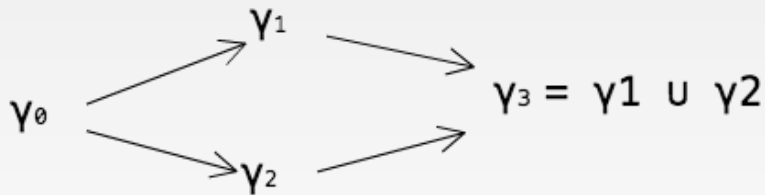
ECの洗練化（本研究）



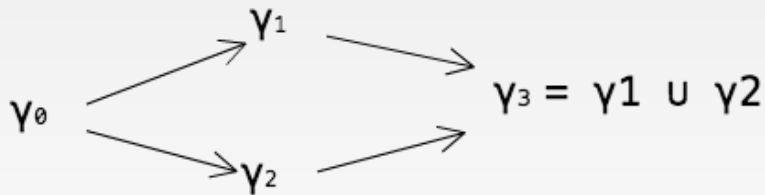
計算
 \Rightarrow



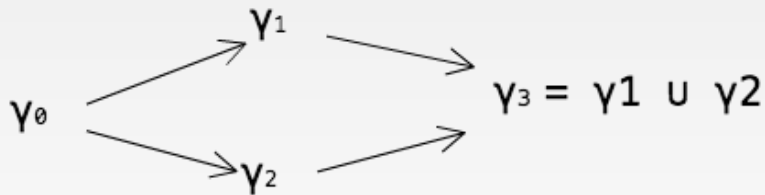




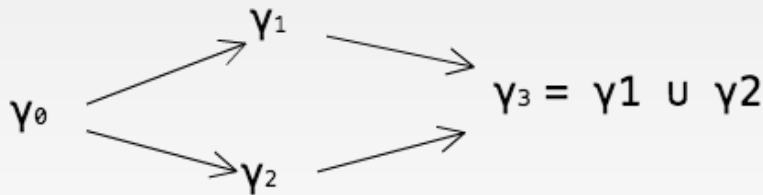
- γ_1 のコードレベル変数は γ_2 では使えない



- γ_1 のコードレベル変数は γ_2 では使えない
- γ_2 のコードレベル変数は γ_1 では使えない



- γ_1 のコードレベル変数は γ_2 では使えない
- γ_2 のコードレベル変数は γ_1 では使えない
- γ_1, γ_2 のコードレベル変数は γ_3 で使える



- γ_1 のコードレベル変数は γ_2 では使えない
 - γ_2 のコードレベル変数は γ_1 では使えない
 - γ_1, γ_2 のコードレベル変数は γ_3 で使える
- ⇒ Sudo らの体系に \cup を追加

コード生成+shift0/reset0 の型システム (の一部)

Typing rule for code-level let (derived rule):

$$\frac{\Gamma \vdash e_1 : \langle t_1 \rangle^\gamma \quad \Gamma, \gamma_1 \geq \gamma, x : \langle t_1 \rangle^{\gamma_1} \vdash e_2 : \langle t_2 \rangle^{\gamma_1}}{\Gamma \vdash \mathbf{clet} \ x = e_1 \ \mathbf{in} \ e_2 : \langle t_2 \rangle^\gamma} \quad (\gamma_1 \text{ is eigen var})$$

Typing rule for code-level reset0:

$$\frac{\Gamma \vdash e : \langle t \rangle^\gamma}{\Gamma \vdash \mathbf{reset0} \ e : \langle t \rangle^\gamma}$$

Typing rule for code-level shift0:

$$\frac{\Gamma, k : (\langle t_1 \rangle^{\gamma_1} \Rightarrow \langle t_0 \rangle^{\gamma_0}) \vdash e : \langle t_0 \rangle^{\gamma_0} \quad \Gamma \models \gamma_1 \geq \gamma_0}{\Gamma \vdash \mathbf{shift0} \ k \rightarrow e : \langle t_1 \rangle^{\gamma_1}}$$

Typing rule for code-level throw:

$$\frac{\Gamma, \gamma_3 \geq \gamma_1, \gamma_3 \geq \gamma_2 \vdash e : \langle t_1 \rangle^{\gamma_3} \quad \Gamma \models \gamma_2 \geq \gamma_0}{\Gamma, k : (\langle t_1 \rangle^{\gamma_1} \Rightarrow \langle t_0 \rangle^{\gamma_0}) \vdash \mathbf{throw} \ k \ e : \langle t_0 \rangle^{\gamma_2}} \quad (\gamma_3 \text{ is eigen var})$$

アウトライン

- ① 概要
- ② 研究の背景
- ③ 研究の目的
- ④ 研究の内容
- ⑤ **まとめと今後の課題**

まとめと今後の課題

まとめ

- コード生成言語の型システムに `shift0/reset0` を組み込んだ型システムの設計を完成させた.
- 安全なコードの場合に型が付くこと, 安全でないコードの場合には型が付かないように意図通りに型システムが設計できていることをみた

今後の課題

- 設計した型システムの健全性の証明 (Subject reduction 等) を行い, 実装を完成させる

APPENDIX

⑥ 健全性の証明

健全性の証明 (Subject Reduction)

型安全性 (型システムの健全性; Subject Reduction 等の性質) を厳密に証明する.

Subject Redcution Property

$\Gamma \vdash M : \tau$ が導ければ (プログラム M が型検査を通れば), M を計算して得られる任意の N に対して, $\Gamma \vdash N : \tau$ が導ける (N も型検査を通り, M と同じ型, 同じ自由変数を持つ)