多段階 let 挿入を行うコード生成言語の型システムの設計

大石純平　亀山幸義

筑波大学 コンピュータ・サイエンス専攻

2016/9/9

日本ソフトウェア科学会第 33 回大会

アウトライン

アウトライン

概要

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

概要

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

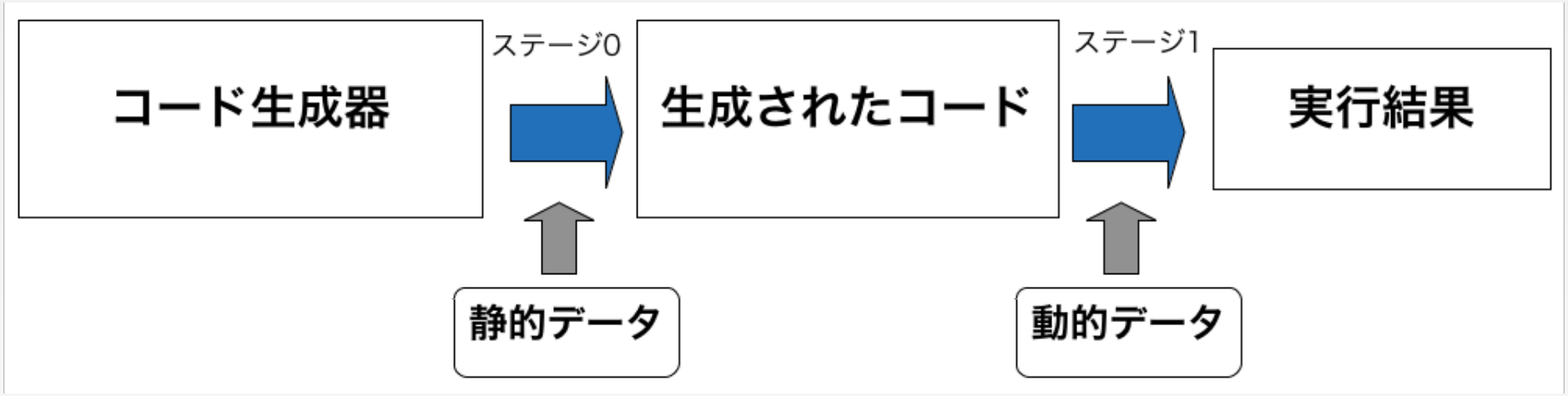
概要

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

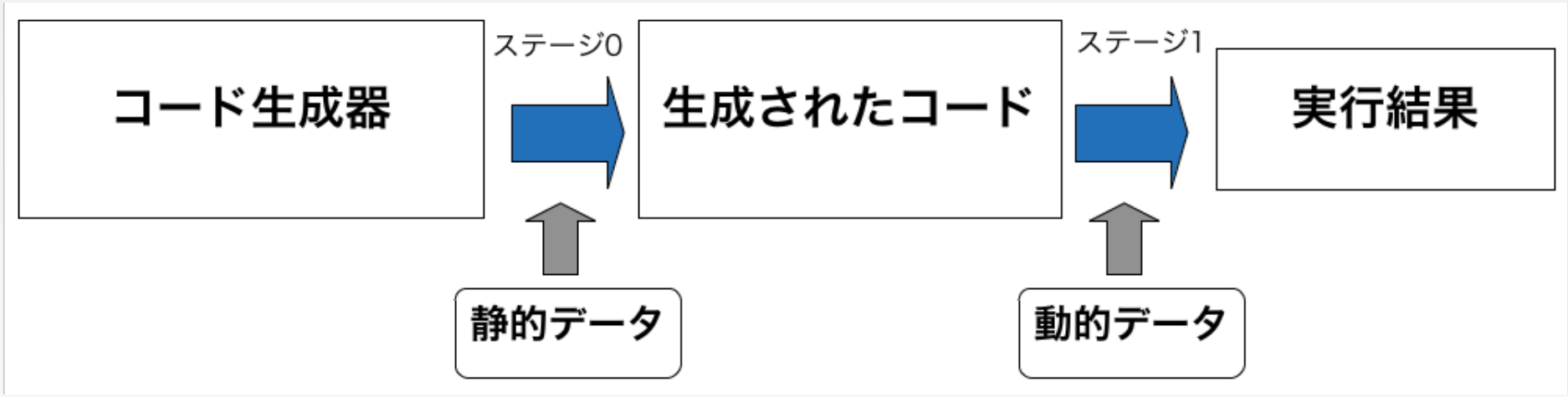
⇒ **多段階** let **挿入**を効率的かつ安全に扱うための型システムを構築

コード生成



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

コード生成



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

○ 生成するプログラムだけでなく，生成されたプログラムも型の整合性が静的に (生成前に) 保証される

コード生成言語による記述例

コード生成言語による記述例

コード生成器 $\rightsquigarrow^*$ 生成されるコード

コード生成言語による記述例

コード生成器 $\rightsquigarrow^*$ 生成されるコード

$(\underline{\textbf{int}}\ 3)$

コード生成言語による記述例

コード生成器 $\rightsquigarrow^*$ 生成されるコード

$(\underline{\textbf{int}}\ 3) \rightsquigarrow^*$ <3>

コード生成言語による記述例

コード生成器 $\rightsquigarrow^*$ **生成されるコード**

$(\underline{\textbf{int}}\ 3) \rightsquigarrow^*$ <3>

$(\underline{\textbf{int}}\ 3)\ \underline{+}\ (\underline{\textbf{int}}\ 5)$

コード生成言語による記述例

コード生成器 $\rightsquigarrow^*$	生成されるコード
$(\underline{\textbf{int}}\ 3)$	$\rightsquigarrow^*$ <3>
$(\underline{\textbf{int}}\ 3)\ \underline{+}\ (\underline{\textbf{int}}\ 5)$	$\rightsquigarrow^*$ <3 + 5>

コード生成言語による記述例

コード生成器 $\rightsquigarrow^*$	生成されるコード
$(\underline{\textbf{int}}\ 3)$	$\rightsquigarrow^*$ <3>
$(\underline{\textbf{int}}\ 3)\ \underline{+}\ (\underline{\textbf{int}}\ 5)$	$\rightsquigarrow^*$ <3 + 5>
$\underline{\lambda} x.\ x\ \underline{+}\ (\underline{\textbf{int}}\ 3)$	

コード生成言語による記述例

コード生成器 $\rightsquigarrow^*$	生成されるコード
$(\underline{\textbf{int}}\ 3)$	$\rightsquigarrow^*$ <3>
$(\underline{\textbf{int}}\ 3)\ \underline{+}\ (\underline{\textbf{int}}\ 5)$	$\rightsquigarrow^*$ <3 + 5>
$\underline{\lambda}x.\ x\ \underline{+}\ (\underline{\textbf{int}}\ 3)$	$\rightsquigarrow^*$ <$\lambda x'.x' + 3$>

コード生成言語による記述例

コード生成器 $\rightsquigarrow^*$	生成されるコード
$(\underline{\textbf{int}}\ 3)$	$\rightsquigarrow^*$ <3>
$(\underline{\textbf{int}}\ 3)\ \underline{+}\ (\underline{\textbf{int}}\ 5)$	$\rightsquigarrow^*$ <3 + 5>
$\underline{\lambda} x.\ x\ \underline{+}\ (\underline{\textbf{int}}\ 3)$	$\rightsquigarrow^*$ <$\lambda x'.x' + 3$>

$\underline{\textbf{for}}\ x = \cdots\ \underline{\textbf{to}}\ \cdots\ \underline{\textbf{do}}\ \cdots$

コード生成言語による記述例

コード生成器 $\rightsquigarrow^*$	生成されるコード
$(\underline{\textbf{int}}\ 3)$	$\rightsquigarrow^*$ <3>
$(\underline{\textbf{int}}\ 3)\ \underline{+}\ (\underline{\textbf{int}}\ 5)$	$\rightsquigarrow^*$ <3 + 5>
$\underline{\lambda} x.\ x\ \underline{+}\ (\underline{\textbf{int}}\ 3)$	$\rightsquigarrow^*$ <$\lambda x'.x' + 3$>
$\underline{\textbf{for}}\ x = \cdots\ \underline{\textbf{to}}\ \cdots\ \underline{\textbf{do}}\ \cdots$	$\rightsquigarrow^*$ <**for** $x' = \cdots$ **to** $\cdots$ **do** $\cdots$>

コード生成言語による記述例

$$\textbf{コード生成器} \rightsquigarrow^* \textbf{生成されるコード}$$

$$(\underline{\textbf{int}}\ 3) \rightsquigarrow^* \langle 3 \rangle$$

$$(\underline{\textbf{int}}\ 3)\ \underline{+}\ (\underline{\textbf{int}}\ 5) \rightsquigarrow^* \langle 3 + 5 \rangle$$

$$\underline{\lambda} x.\ x\ \underline{+}\ (\underline{\textbf{int}}\ 3) \rightsquigarrow^* \langle \lambda x'.x' + 3 \rangle$$

$$\underline{\textbf{for}}\ x = \cdots\ \underline{\textbf{to}}\ \cdots\ \underline{\textbf{do}}\ \cdots \rightsquigarrow^* \langle \textbf{for}\ x' = \cdots\ \textbf{to}\ \cdots\ \textbf{do}\ \cdots \rangle$$

コードコンビネータ

- 下線つきの演算子
- コードを引数にとり，コードを返す

power 関数のコード生成器

普通の power **関数**

$$\begin{aligned}\text{power} = \ & \lambda x.\textbf{fix}\ \lambda f.\lambda n. \\ & \quad \textbf{if}\ n = 0\ \textbf{then}\ 1 \\ & \quad \textbf{else}\ x\ \times\ (f\ (n-1))\end{aligned}$$

power 関数のコード生成器

gen_power: power コード生成器

$$\begin{aligned}\text{gen\_power} = \ & \underline{\lambda}x.\textbf{fix}\ \lambda f.\lambda n. \\ & \quad \textbf{if}\ n = 0\ \textbf{then}\ (\underline{\textbf{int}}\ 1) \\ & \quad \textbf{else}\ x\ \underline{\times}\ (f\ (n-1))\end{aligned}$$

power 関数のコード生成器

gen_power: power コード生成器

$$\begin{aligned}\text{gen\_power} = \ & \underline{\lambda} x.\textbf{fix}\ \lambda f.\lambda n. \\ & \quad \textbf{if}\ n = 0\ \textbf{then}\ (\underline{\textbf{int}}\ 1) \\ & \quad \textbf{else}\ x\ \underline{\times}\ (f\ (n-1))\end{aligned}$$

$n = 5$ に特化したコード生成:

power 関数のコード生成器

gen_power: power **コード生成器**

$$\begin{aligned}\text{gen\_power} = \ & \underline{\lambda} x.\textbf{fix}\ \lambda f.\lambda n. \\ & \quad \textbf{if}\ n = 0\ \textbf{then}\ (\underline{\textbf{int}}\ 1) \\ & \quad \textbf{else}\ x\ \underline{\times}\ (f\ (n-1))\end{aligned}$$

$n = 5$ **に特化したコード生成**:

$$\underline{\lambda} x.\ \text{gen\_power}\ x\ 5 \rightsquigarrow^* \langle \lambda x'.\ x' \times x' \times x' \times x' \times x' \times 1 \rangle$$

power 関数のコード生成器

gen_power: power **コード生成器**

$$\begin{aligned}\text{gen\_power} = \ & \underline{\lambda} x.\textbf{fix}\ \lambda f.\lambda n. \\ & \quad \textbf{if}\ n = 0\ \textbf{then}\ (\underline{\textbf{int}}\ 1) \\ & \quad \textbf{else}\ x\ \underline{\times}\ (f\ (n-1))\end{aligned}$$

$n = 5$ **に特化したコード生成**:

$$\underline{\lambda} x.\ \text{gen\_power}\ x\ 5 \rightsquigarrow^* \langle \lambda x'.\ x' \times x' \times x' \times x' \times x' \times 1 \rangle$$

gen_power **関数によって生成されたコードは** power **関数より高速**

二重 for ループのコード生成器

コード生成器

$$\underline{\textbf{for}}\ x = (\underline{\textbf{int}}\ 0)\ \underline{\textbf{to}}\ (\underline{\textbf{int}}\ n)\ \underline{\textbf{do}}$$
$$\underline{\textbf{for}}\ y = (\underline{\textbf{int}}\ 0)\ \underline{\textbf{to}}\ (\underline{\textbf{int}}\ m)\ \underline{\textbf{do}}$$
$$\underline{\textbf{set}}\ a\ (x, y)\ \text{complex calculation}$$

二重 for ループのコード生成器

コード生成器

$$\underline{\textbf{for}}\ x = (\underline{\textbf{int}}\ 0)\ \underline{\textbf{to}}\ (\underline{\textbf{int}}\ n)\ \underline{\textbf{do}}$$
$$\underline{\textbf{for}}\ y = (\underline{\textbf{int}}\ 0)\ \underline{\textbf{to}}\ (\underline{\textbf{int}}\ m)\ \underline{\textbf{do}}$$
$$\underline{\textbf{set}}\ a\ (x, y)\ \text{complex calculation}$$

生成されるコード

$$< \textbf{for}\ x' = 0\ \textbf{to}\ n\ \textbf{do}$$
$$\textbf{for}\ y' = 0\ \textbf{to}\ m\ \textbf{do}$$
$$a[x', y'] \leftarrow \text{complex calculation} >$$

多段階 let 挿入

生成されるコード

< **for** $x' = 0$ **to** n **do**

for $y' = 0$ **to** m **do**

$a[x', y'] \leftarrow$ complex calculation

$b[x', y'] \leftarrow$ complex calculation>

多段階 let 挿入

生成されるコード

$<$ **let** $w =$ complex calculation **in**
  for $x' = 0$ **to** n **do**
    let $u =$ complex calculation **in**
    for $y' = 0$ **to** m **do**
      $a[x', y'] \leftarrow u$
      $b[x', y'] \leftarrow w$ $>$

多段階 let 挿入

生成されるコード

< **let** $w =$ complex calculation **in**
for $x' = 0$ **to** n **do**
let $u =$ complex calculation **in**
for $y' = 0$ **to** m **do**
$a[x', y'] \leftarrow u$
$b[x', y'] \leftarrow w$ >

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**複数のコード移動**を許す仕組み
- ループ不変式の移動等によって，**効率的なコード生成**に必要なプログラミング技法

危険な例

危険なコード生成の例

生成される危険なコード

< **for** $x' = 0$ **to** n **do**

for $y' = 0$ **to** m **do**

$a[x', y'] \leftarrow$ complex calculation

$b[x', y'] \leftarrow$ complex calculation>

危険なコード生成の例

生成される危険なコード

< **let** $w =$ complex calculation **in**
for $x' = 0$ **to** n **do**
let $u =$ complex calculation **in**
for $y' = 0$ **to** m **do**
$a[x', y'] \leftarrow u$
$b[x', y'] \leftarrow w$ >

危険なコード生成の例

生成される危険なコード

< **let** $w =$ complex calculation **in** — w が x にも y にも依存する式
  for $x' = 0$ **to** n **do**
    let $u =$ complex calculation **in** — u が y に依存する式
    for $y' = 0$ **to** m **do**
      $a[x', y'] \leftarrow u$
      $b[x', y'] \leftarrow w$ >

危険なコード生成の例

生成される危険なコード

< **let** $w =$ complex calculation **in** — w が x にも y にも依存する式
  for $x' = 0$ **to** n **do**
    let $u =$ complex calculation **in** — u が y に依存する式
    for $y' = 0$ **to** m **do**
      $a[x', y'] \leftarrow u$
      $b[x', y'] \leftarrow w$ >

complex calculation によって挿入できる場所が異なる

- 多段階 let 挿入が可能となっても，安全に挿入できる場所とそうでない場所がある
- 安全に let 挿入を行うためにどうすればよいかを考える必要がある

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

アウトライン

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

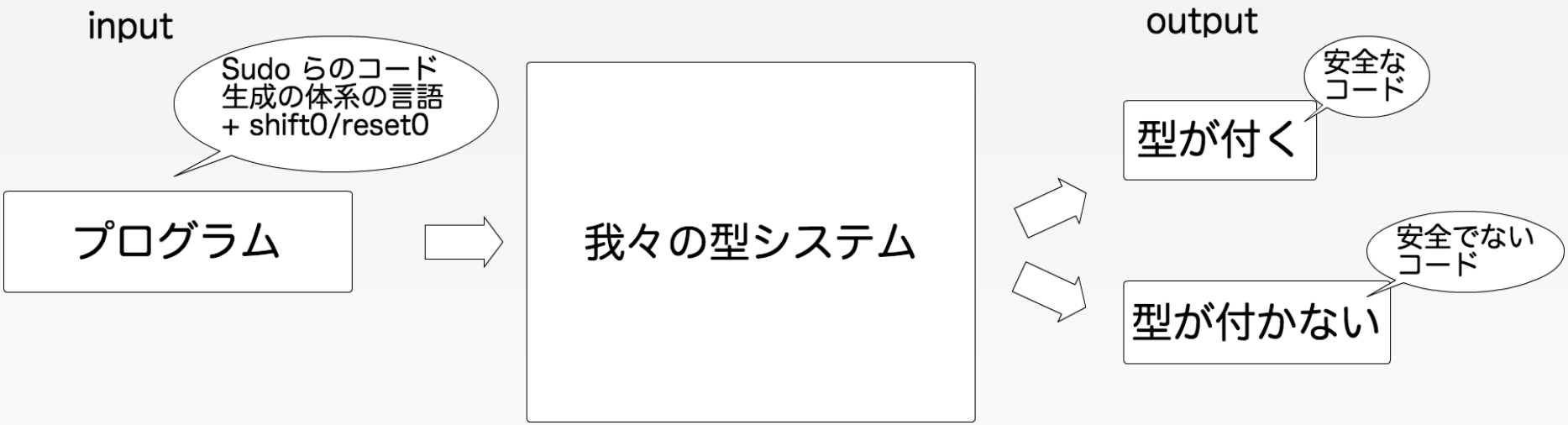
本研究: 簡潔で強力なコントロールオペレータに基づくコード生成体系の構築

- 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

表現力を上げ（コードレベルでの多段階let挿入），安全性も保証するためにどうすればよいのか

本研究の手法


input
Sudo らのコード
生成の体系の言語
+ shift0/reset0
プログラム
我々の型システム
output
安全な
コード
型が付く
安全でない
コード
型が付かない

まず表現力について

コード生成器と生成されるコード

コード生成器

... **for** $x = e1$ **to** $e2$ **do**
... **for** $y = e3$ **to** $e4$ **do**
... **let** $u = t$ **in**
... **set** <a> (x, y) u

$\rightsquigarrow^*$

生成されるコード

$\langle$**let** $u' = t'$ **in**
for $x' = e1'$ **to** $e2'$ **do**
for $y' = e3'$ **to** $e4'$ **do**
$a[x', y'] \leftarrow u' \rangle$

shift0/reset0 による let 挿入

コード生成器:

$$\underline{\textbf{for}}\ x = e1\ \underline{\textbf{to}}\ e2\ \underline{\textbf{do}}$$
$$\underline{\textbf{for}}\ y = e3\ \underline{\textbf{to}}\ e4\ \underline{\textbf{do}}$$
$$\underline{\textbf{let}}\ u = t\ \underline{\textbf{in}}$$
$$(\underline{\textbf{set}}\ a\ (x, y)\ u)$$

生成コード:

shift0/reset0 による let 挿入

コード生成器:

$$\underline{\textbf{for}}\ x = e1\ \underline{\textbf{to}}\ e2\ \underline{\textbf{do}}$$
$$\textbf{reset0}\ \ \underline{\textbf{for}}\ y = e3\ \underline{\textbf{to}}\ e4\ \underline{\textbf{do}}$$
$$\textbf{shift0}\ k\ \rightarrow\ \underline{\textbf{let}}\ u = t\ \underline{\textbf{in}}$$
$$(\textbf{throw}\ k\ (\underline{\textbf{set}}\ a\ (x, y)\ u))$$

生成コード:

shift0/reset0 による let 挿入

$$\textbf{reset0}\ (E[\textbf{shift0}\ k \to e]) \to e\{k \Leftarrow E\}$$

コード生成器: $\underline{\textbf{for}}\ x = e1\ \underline{\textbf{to}}\ e2\ \underline{\textbf{do}}$

$\textbf{reset0}\ \ \underline{\textbf{for}}\ y = e3\ \underline{\textbf{to}}\ e4\ \underline{\textbf{do}}$

$\textbf{shift0}\ k\ \to\ \underline{\textbf{let}}\ u = t\ \underline{\textbf{in}}$

$(\textbf{throw}\ k\ (\underline{\textbf{set}}\ a\ (x, y)\ u))$

$k \Leftarrow\ \ \underline{\textbf{for}}\ y = e3\ \underline{\textbf{to}}\ e4\ \underline{\textbf{do}}\ [\ ]$

生成コード: $\langle\ \textbf{for}\ x' = e1'\ \textbf{to}\ e2'\ \textbf{do}$

$\textbf{let}\ u'\ =\ t'\ \textbf{in}$

$\textbf{for}\ y' = e3'\ \textbf{to}\ e4'\ \textbf{do}$

$a[x', y'] \leftarrow u'\ \rangle$

shift0/reset0 による let 挿入

$$\textbf{reset0}\ (E[\textbf{shift0}\ k \to e]) \to e\{k \Leftarrow E\}$$

コード生成器: $\textbf{reset0}\ \ \underline{\textbf{for}}\ x = e1\ \underline{\textbf{to}}\ e2\ \underline{\textbf{do}}$
$\underline{\textbf{for}}\ y = e3\ \underline{\textbf{to}}\ e4\ \underline{\textbf{do}}$
$\textbf{shift0}\ k\ \to\ \underline{\textbf{let}}\ u = t\ \underline{\textbf{in}}$
$(\textbf{throw}\ k\ (\underline{\textbf{set}}\ a\ (x, y)\ u))$

生成コード:

shift0/reset0 による let 挿入

$$\textbf{reset0}\ (E[\textbf{shift0}\ k \to e]) \to e\{k \Leftarrow E\}$$

コード生成器: $\textbf{reset0}\ \ \underline{\textbf{for}}\ x = e1\ \underline{\textbf{to}}\ e2\ \underline{\textbf{do}}$

$\underline{\textbf{for}}\ y = e3\ \underline{\textbf{to}}\ e4\ \underline{\textbf{do}}$

$\textbf{shift0}\ k\ \to\ \underline{\textbf{let}}\ u = t\ \underline{\textbf{in}}$

$(\textbf{throw}\ k\ (\underline{\textbf{set}}\ a\ (x, y)\ u))$

$k \Leftarrow\ \ \underline{\textbf{for}}\ x = e1\ \underline{\textbf{to}}\ e2\ \underline{\textbf{do}}\ \ \underline{\textbf{for}}\ y = e3\ \underline{\textbf{to}}\ e4\ \underline{\textbf{do}}\ \ [\ ]$

生成コード: $\langle\ \textbf{let}\ u' = t'\ \textbf{in}$

$\textbf{for}\ x' = e1'\ \textbf{to}\ e2'\ \textbf{do}$

$\textbf{for}\ y' = e3'\ \textbf{to}\ e4'\ \textbf{do}$

$a[x', y'] \leftarrow u'\ \rangle$

shift0/reset0 による多段階 let 挿入

$$\textbf{reset0}\ (E[\textbf{shift0}\ k \to e]) \to e\{k \Leftarrow E\}$$

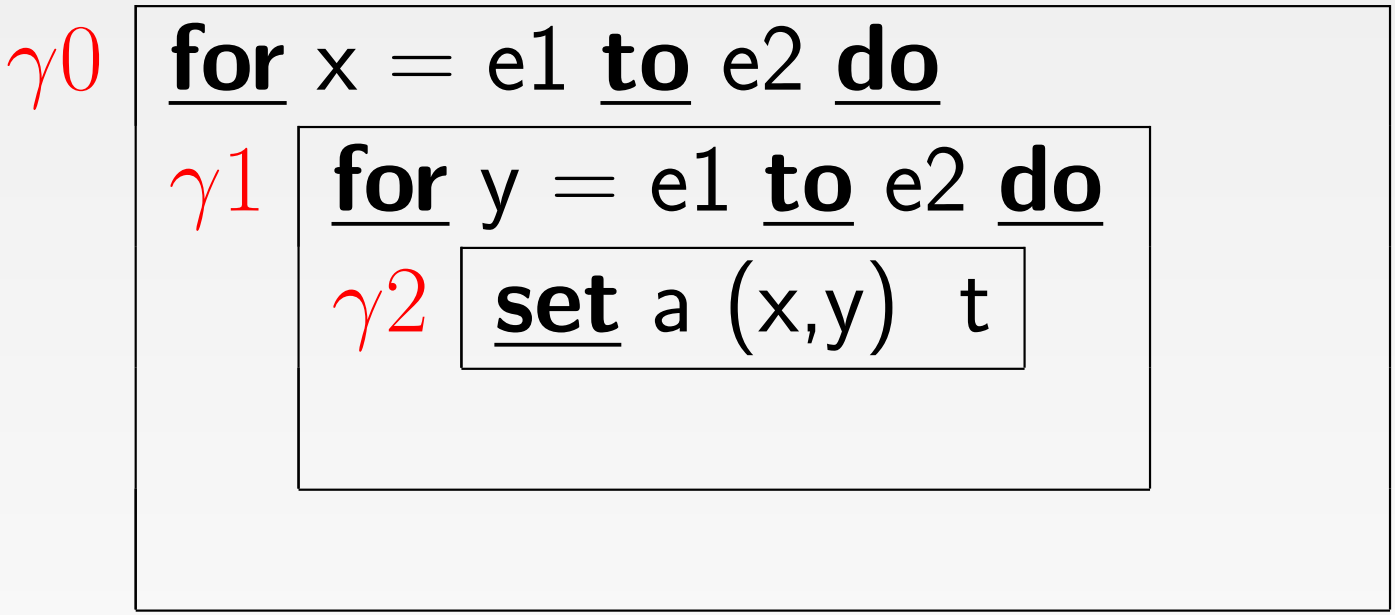
コード生成器: reset0 for $x = e1$ to $e2$ do
reset0 for $y = e3$ to $e4$ do
shift0 k_2 → shift0 k_1 → let $u = t$ in
throw k_1 (throw k_2 (set a (x, y) u))

生成コード: $\langle$ let $u' = t'$ in
for $x' = e1'$ to $e2'$ do
for $y' = e3'$ to $e4'$ do
$a[x', y'] \leftarrow u'$ $\rangle$

次に安全性

コード生成前の段階で，安全なコードかどうかを判断する

環境識別子 (EC) を利用したスコープ表現 [Sudo+2014]



スコープ	使えるコード変数
$\gamma 0$	なし
$\gamma 1$	x
$\gamma 2$	x,y

環境識別子 (EC) を利用したスコープ表現 [Sudo+2014]

型システムでコード変数のスコープを表現:

$$\gamma 2 \geq \gamma 1,\ x : \langle \mathbf{int} \rangle !\gamma 1,\ y : \langle \mathbf{int} \rangle !\gamma 2 \ \vdash\ x : \langle \mathbf{float} \rangle !\gamma 2 \qquad \text{OK}$$

$$\gamma 2 \geq \gamma 1,\ x : \langle \mathbf{int} \rangle !\gamma 1,\ y : \langle \mathbf{int} \rangle !\gamma 2 \ \vdash\ y : \langle \mathbf{float} \rangle !\gamma 1 \qquad \text{NG}$$

$$\gamma 2 \geq \gamma 1,\ x : \langle \mathbf{int} \rangle !\gamma 1,\ y : \langle \mathbf{int} \rangle !\gamma 2 \ \vdash\ x \underline{+} y : \langle \mathbf{int} \rangle !\gamma 2 \qquad \text{OK}$$

コードレベルのラムダ抽象の型付け規則で，固有変数条件を利用:

$$\frac{\Gamma,\ \gamma_2 \geq \gamma_1,\ x : \langle t_1 \rangle !\gamma_2 \vdash e : \langle t_2 \rangle !\gamma_2}{\Gamma \vdash \underline{\lambda} x.e : \langle t_1 \to t_2 \rangle !\gamma_1}\ (\gamma_2 \text{ is eigen var})$$

環境識別子 (EC) を利用したスコープ表現

先行研究:

- **局所的なスコープをもつ破壊的変数をもつコード生成の体系に対する (型安全な) 型システムの構築**
  [Sudo,Kiselyov,Kameyama 2014]
- **グローバルなスコープをもつ破壊的変数への拡張**
  [Kiselyov,Kameyama,Sudo 2016]
- **コントロールオペレータには非対応**

問題点: shift0/reset0 **などのコントロールオペレータは，スコープの包含関係を逆転させてしまう.**

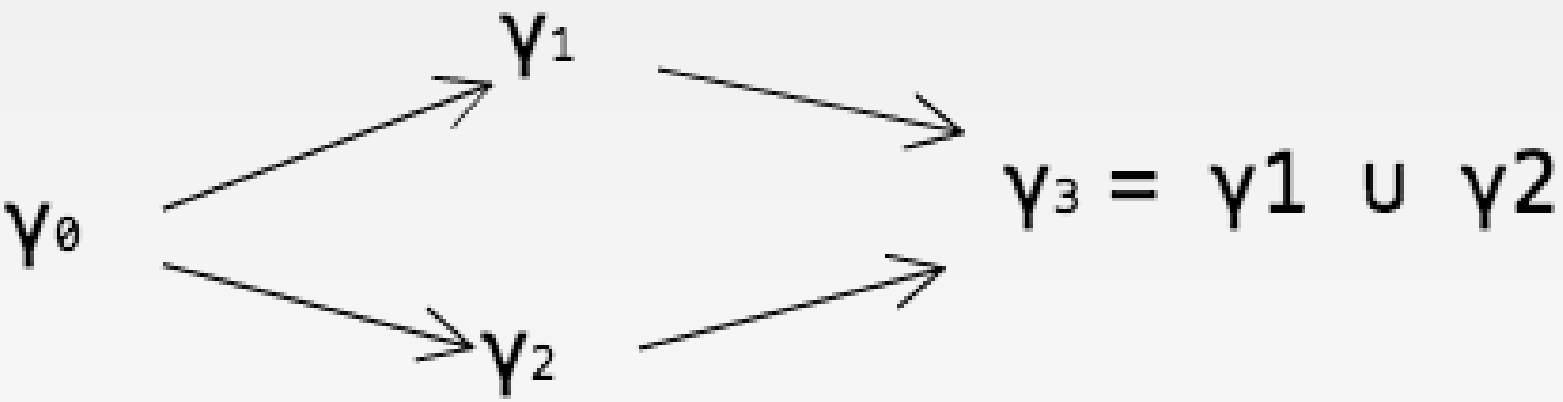
ここに，for ループと shift0/reset0 の例を再掲する.
もとのスライドの 24 ページの絵をかく.

本研究での解決策

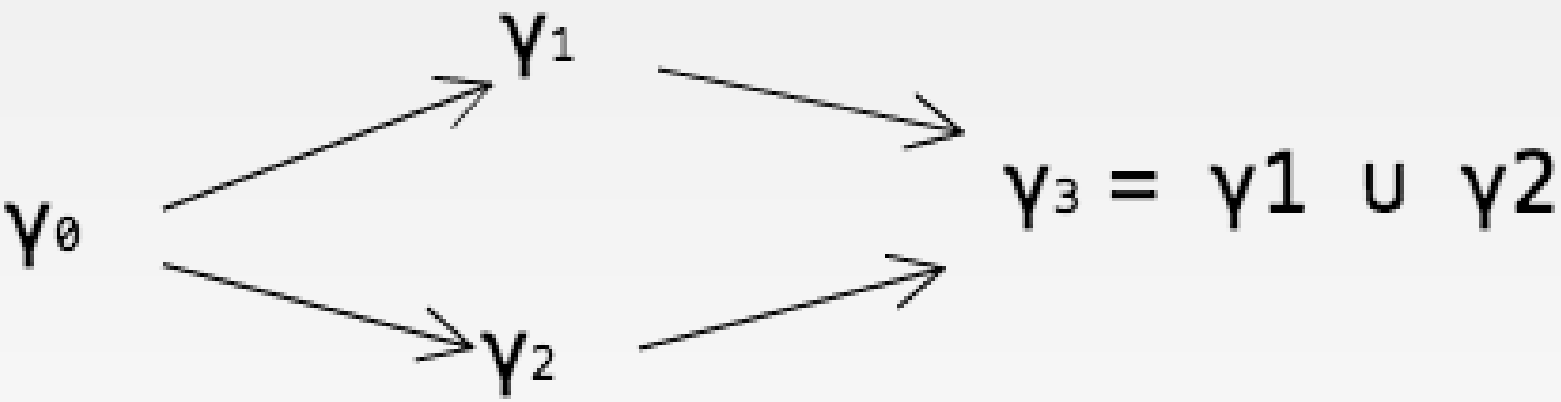
3 つのアイディア:

- 包含関係にない EC
- ジョイン演算子
- EC に関する多相性

EC のジョイン

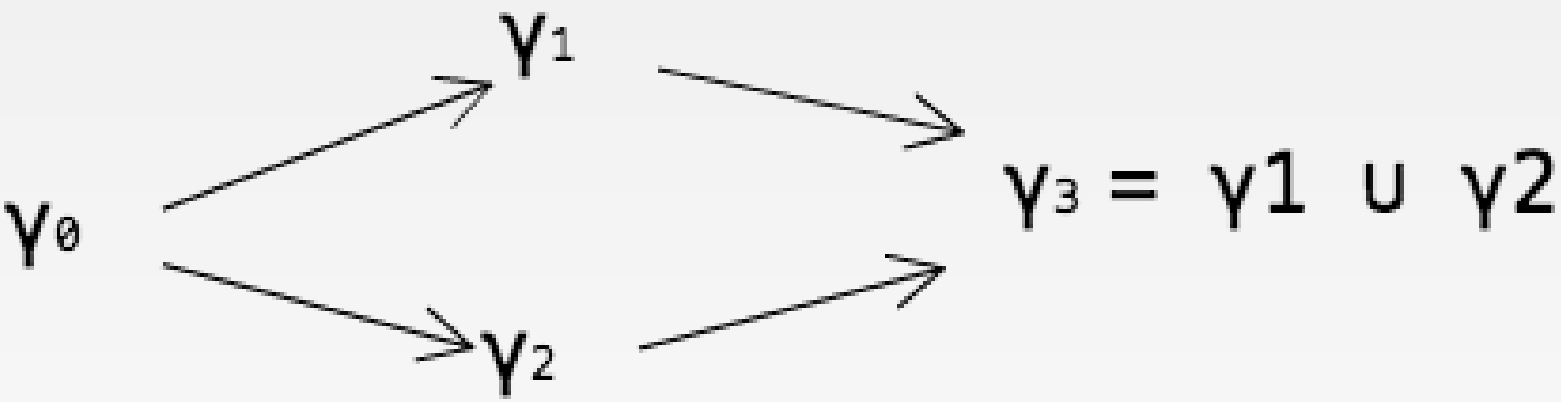


EC のジョイン



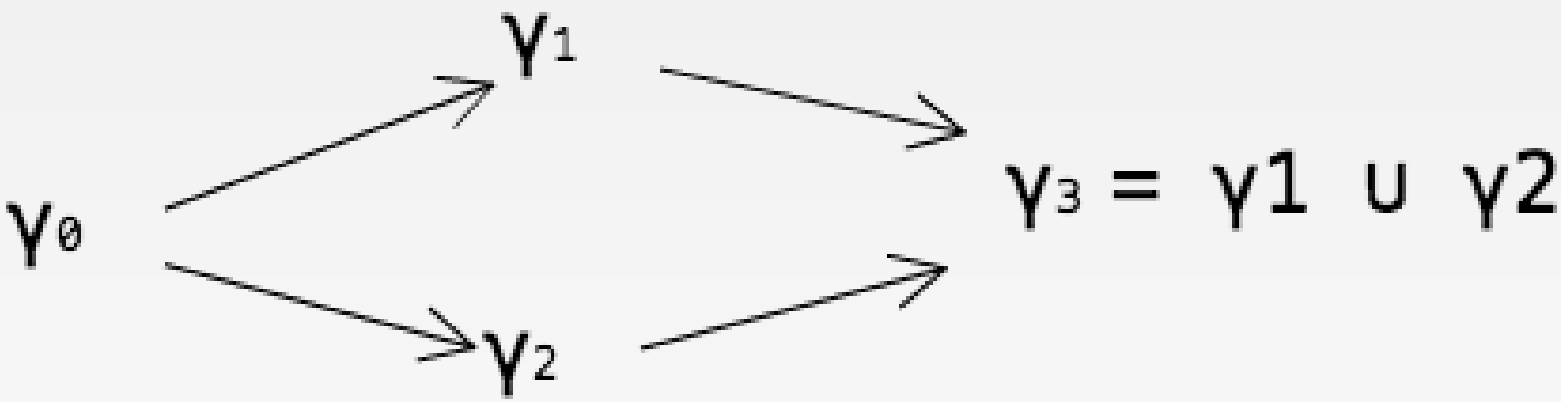
- γ_1 **のコードレベル変数は** γ_2 **では使えない**

EC のジョイン



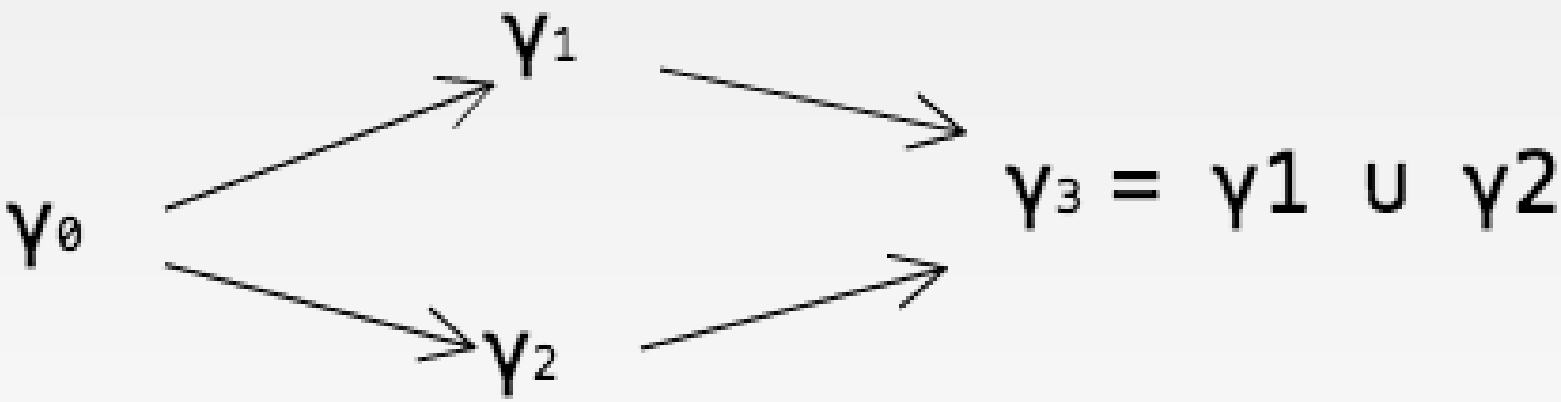
- γ_1 のコードレベル変数は γ_2 では使えない
- γ_2 のコードレベル変数は γ_1 では使えない

EC のジョイン



- 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

EC のジョイン



- 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

$\Rightarrow$ 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)

コードレベルのラムダ抽象:

$$\frac{\Gamma,\ \gamma_1 \geq \gamma,\ x : \langle t_1 \rangle^{\gamma_1} \vdash e : \langle t_2 \rangle^{\gamma_1}; \sigma}{\Gamma \vdash \underline{\lambda} x.e : \langle t_1 \to t_2 \rangle^{\gamma}\ ;\ \sigma}\ (\gamma_1 \text{ is eigen var})$$

reset0:

$$\frac{\Gamma \vdash e : \langle t \rangle^{\gamma}\ ;\ \langle t \rangle^{\gamma}, \sigma}{\Gamma \vdash \textbf{reset0}\ e : \langle t \rangle^{\gamma}\ ;\ \sigma}$$

shift0:

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

throw:

$$\frac{\Gamma \vdash v : \langle t_1 \rangle^{\gamma_1 \cup \gamma_2}; \sigma \quad \Gamma \models \gamma_2 \geq \gamma_0}{\Gamma,\ k : (\langle t_1 \rangle^{\gamma_1} \Rightarrow \langle t_0 \rangle^{\gamma_0})\sigma \vdash \textbf{throw}\ k\ v : \langle t_0 \rangle^{\gamma_2}; \sigma}$$

APPENDIX

アウトライン

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)**