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

1. **概要**
2. 研究の目的
3. 研究の内容

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

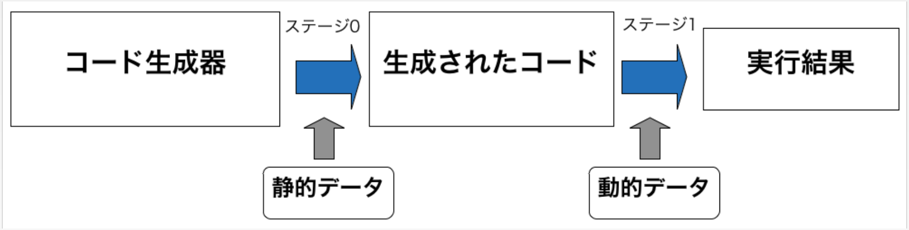
概要

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

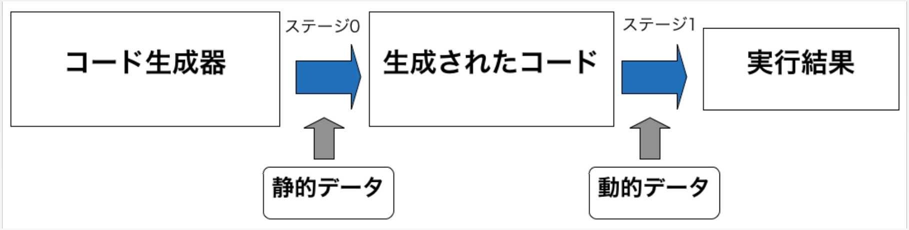
⇒ 多段階 let 挿入を効率的かつ安全に扱うための型システムを構築

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**

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

コード生成言語による記述例

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

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

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

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

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

コード生成言語による記述例

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

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

$$(\underline{\textbf{int}}\ 3)\ \underline{+}\ (\underline{\textbf{int}}\ 5) \rightsquigarrow^* \text{<}3+5\text{>}$$

$$\underline{\lambda} x.\ x\ \underline{+}\ (\underline{\textbf{int}}\ 3) \rightsquigarrow^* \text{<}\lambda x'.x' + 3\text{>}$$

コード生成言語による記述例

$$\text{コード生成器} \leadsto^* \text{生成されるコード}$$

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

$$(\underline{\textbf{int}}\ 3)\ \underline{+}\ (\underline{\textbf{int}}\ 5) \leadsto^* \texttt{<}3+5\texttt{>}$$

$$\underline{\lambda} x.\ x\ \underline{+}\ (\underline{\textbf{int}}\ 3) \leadsto^* \texttt{<}\lambda x'.x'+3\texttt{>}$$

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

コード生成言語による記述例

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

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

$$(\underline{\textsf{int}}\ 3)\ \underline{+}\ (\underline{\textsf{int}}\ 5) \rightsquigarrow^* \texttt{<}3+5\texttt{>}$$

$$\underline{\lambda} x.\ x\ \underline{+}\ (\underline{\textsf{int}}\ 3) \rightsquigarrow^* \texttt{<}\lambda x'.x' + 3\texttt{>}$$

$$\underline{\textsf{for}}\ x = \cdots\ \underline{\textsf{to}}\ \cdots\ \underline{\textsf{do}}\ \cdots \rightsquigarrow^* \texttt{<}\textsf{for}\ x' = \cdots\ \textsf{to}\ \cdots\ \textsf{do}\ \cdots\texttt{>}$$

コード生成言語による記述例

コード生成器 $\leadsto^*$ **生成されるコード**

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

$$(\underline{\textbf{int}}\ 3)\ \underline{+}\ (\underline{\textbf{int}}\ 5) \leadsto^* <3+5>$$

$$\underline{\lambda}x.\ x\ \underline{+}\ (\underline{\textbf{int}}\ 3) \leadsto^* <\lambda x'.x' + 3>$$

$$\underline{\textbf{for}}\ x = \cdots\ \underline{\textbf{to}}\ \cdots\ \underline{\textbf{do}}\ \cdots \leadsto^* <\textbf{for}\ x' = \cdots\ \textbf{to}\ \cdots\ \textbf{do}\ \cdots>$$

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

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

power 関数のコード生成器

`gen_power`: power **コード生成器**

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

power 関数のコード生成器

`gen_power`: power **コード生成器**

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

$n = 5$ **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**

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

$n = 5$ **に特化したコード生成**:

$$\underline{\lambda} x.\ \mathsf{gen\_power}\ x\ 5 \leadsto^{*} <\lambda x'.\ x' \times x' \times x' \times x' \times x' \times 1>$$

power 関数のコード生成器

`gen_power`: power コード生成器

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

$n = 5$ に特化したコード生成:

$$
\underline{\lambda} x.\ \mathsf{gen\_power}\ x\ 5 \rightsquigarrow^{*} \texttt{<}\lambda x'.\ x' \times x' \times x' \times x' \times x' \times 1\texttt{>}
$$

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

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

二重 for ループのコード生成器

コード生成器

$$\underline{\textbf{for}}\ x = (\underline{\textbf{int}}\ 0)\ \underline{\textbf{to}}\ (\underline{\textbf{int}}\ n)\ \underline{\textbf{do}}$$

$$\quad \underline{\textbf{for}}\ y = (\underline{\textbf{int}}\ 0)\ \underline{\textbf{to}}\ (\underline{\textbf{int}}\ m)\ \underline{\textbf{do}}$$

$$\qquad \underline{\textbf{set}}\ a\ (x, y)\ \text{complex calculation}$$

生成されるコード

$$< \textbf{for}\ x' = 0\ \textbf{to}\ n\ \textbf{do}$$

$$\quad \textbf{for}\ y' = 0\ \textbf{to}\ m\ \textbf{do}$$

$$\qquad a[x', y'] \leftarrow \text{complex calculation} >$$

多段階 let 挿入の例

生成されるコード

$< \textbf{for } x' = 0 \textbf{ to } n \textbf{ do}$

$\quad \textbf{for } y' = 0 \textbf{ to } m \textbf{ do}$

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

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

多段階 let 挿入の例

生成されるコード

$$
\begin{array}{l}
< \textbf{let } w = \text{complex calculation } \textbf{in} \\
\quad \textbf{for } x' = 0 \textbf{ to } n \textbf{ do} \\
\quad\quad \textbf{let } u = \text{complex calculation } \textbf{in} \\
\quad\quad \textbf{for } y' = 0 \textbf{ to } m \textbf{ do} \\
\quad\quad\quad a[x', y'] \leftarrow u \\
\quad\quad\quad b[x', y'] \leftarrow w \qquad\qquad\qquad\qquad >
\end{array}
$$

多段階 let 挿入の例

生成されるコード

$$
\begin{array}{l}
<\ \textbf{let}\ w = \text{complex calculation}\ \textbf{in} \\
\quad \textbf{for}\ x' = 0\ \textbf{to}\ n\ \textbf{do} \\
\quad\ \ \textbf{let}\ u = \text{complex calculation}\ \textbf{in} \\
\quad\ \ \textbf{for}\ y' = 0\ \textbf{to}\ m\ \textbf{do} \\
\quad\quad a[x', y'] \leftarrow u \\
\quad\quad b[x', y'] \leftarrow w \qquad\qquad\qquad\qquad >
\end{array}
$$

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

1. 概要
2. 研究の目的
3. 研究の内容

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

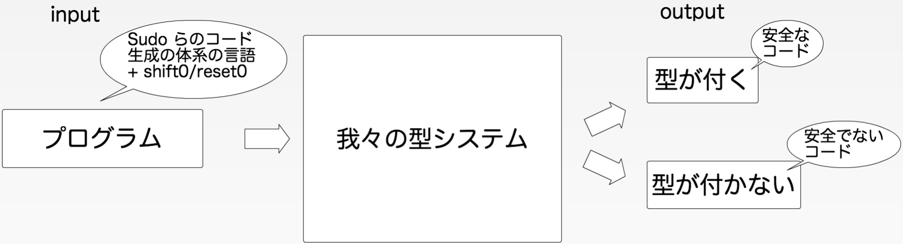
本研究: 簡潔で強力なコントロールオペレータに基づくコード生成体系の構築

- 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

let 挿入の実現方法

コード生成器

$\ldots$ <u>**for**</u> $x = e1$ <u>**to**</u> $e2$ <u>**do**</u>

$\ldots$ <u>**for**</u> $y = e3$ <u>**to**</u> $e4$ <u>**do**</u>

<u>**set**</u> <a> (x, y) $\ldots$ comp calc

$\rightsquigarrow^*$

生成されるコード

<**let** u' $=$ comp calc$'$ **in**

for $x' = e1'$ **to** $e2'$ **do**

for $y' = e3'$ **to** $e4'$ **do**

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

let 挿入の実現方法

コード生成器

… **for** $x = e1$ **to** $e2$ **do**

… **for** $y = e3$ **to** $e4$ **do**

set <a> (x, y) … comp calc

$\rightsquigarrow^*$

生成されるコード

<**let** u' = comp calc$'$ **in**

for $x' = e1'$ **to** $e2'$ **do**

for $y' = e3'$ **to** $e4'$ **do**

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

shift0/reset0 の導入

… のところに後に説明する shift0/reset0 というコントロールオペレータを用いることで，多段階 let 挿入を行う

shift0/reset0 による let 挿入

コード生成器:

$$\underline{\textbf{for}}\ x = e1\ \underline{\textbf{to}}\ e2\ \underline{\textbf{do}}$$
$$\quad \underline{\textbf{for}}\ y = e3\ \underline{\textbf{to}}\ e4\ \underline{\textbf{do}}$$
$$\quad\quad \underline{\textbf{set}}\ a\ (x, y)\ cc$$

shift0/reset0 による let 挿入

コード生成器: **reset0** <u>**for**</u> $x = e1$ <u>**to**</u> $e2$ <u>**do**</u>
<u>**for**</u> $y = e3$ <u>**to**</u> $e4$ <u>**do**</u>
<u>**set**</u> $a\ (x, y)$ **shift0** $k \rightarrow$<u>**let**</u> $u = cc$ <u>**in**</u> **throw** $k\ u$

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: $\textbf{reset0}\ \underline{\textbf{for}}\ x = e1\ \underline{\textbf{to}}\ e2\ \underline{\textbf{do}}$

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

$\underline{\textbf{set}}\ a\ (x, y)\ \textbf{shift0}\ k \to \underline{\textbf{let}}\ u = cc\ \underline{\textbf{in}}\ \textbf{throw}\ k\ u$

$k \Leftarrow\ \underline{\textbf{for}}\ x = e1\ \underline{\textbf{to}}\ e2\ \underline{\textbf{do}}$

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

$\underline{\textbf{set}}\ a\ (x, y)\ [\ ]$

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: $\textbf{reset0}\ \underline{\textbf{for}}\ x = e1\ \underline{\textbf{to}}\ e2\ \underline{\textbf{do}}$

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

$\underline{\textbf{set}}\ a\ (x, y)\ \textbf{shift0}\ k \to \underline{\textbf{let}}\ u = cc\ \underline{\textbf{in}}\ \textbf{throw}\ k\ u$

$k \Leftarrow\ \underline{\textbf{for}}\ x = e1\ \underline{\textbf{to}}\ e2\ \underline{\textbf{do}}$

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

$\underline{\textbf{set}}\ a\ (x, y)\ [\ ]$

生成コード: $<\ \textbf{let}\ u' = cc'\ \textbf{in}$

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

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

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

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**
set $a\ (x, y)$ **shift0** $k_1 \to$ **let** $u = cc1$ **in** **throw** $k_1\ u$
set $b\ (x, y)$ **shift0** $k_2 \to$ **let** $w = cc2$ **in** **throw** $k_2\ w$

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**

set $a\ (x, y)$ **shift0** $k_1 \to$ **let** $u = cc1$ **in** **throw** $k_1\ u$

set $b\ (x, y)$ **shift0** $k_2 \to$ **let** $w = cc2$ **in** **throw** $k_2\ w$

生成コード: < **let** $w' = cc2'$ **in**

for $x' = e1'$ **to** $e2'$ **do**

let $u' = cc1'$ **in**

for $y' = e3'$ **to** $e4'$ **do**

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

$b[x', y'] \leftarrow w'$ >

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]

$\gamma 0$ **for** x = e1 **to** e2 **do**

$\gamma 1$ **for** y = e3 **to** e4 **do**

$\gamma 2$ **set** a (x,y) complex calc

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:

$$\Gamma = \gamma 2 \geq \gamma 1,\ x : \langle \textbf{int} \rangle \hat{}\, \gamma 1,\ y : \langle \textbf{int} \rangle \hat{}\, \gamma 2$$

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:

$$\Gamma = \gamma 2 \geq \gamma 1,\ x : \langle \textbf{int} \rangle\hat{}\gamma 1,\ y : \langle \textbf{int} \rangle\hat{}\gamma 2$$

$$\Gamma \ \vdash\ x : \langle \textbf{int} \rangle\hat{}\gamma 2 \quad \text{OK}$$

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:

$$\Gamma = \gamma 2 \geq \gamma 1,\ x : \langle \textbf{int} \rangle\hat{}\gamma 1,\ y : \langle \textbf{int} \rangle\hat{}\gamma 2$$

$$\Gamma \ \vdash \ x : \langle \textbf{int} \rangle\hat{}\gamma 2 \quad \text{OK}$$
$$\Gamma \ \vdash \ y : \langle \textbf{int} \rangle\hat{}\gamma 1 \quad \text{NG}$$

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:

$$\Gamma = \gamma 2 \geq \gamma 1,\ x : \langle \textbf{int} \rangle\hat{}\gamma 1,\ y : \langle \textbf{int} \rangle\hat{}\gamma 2$$

$\Gamma \ \vdash \ x : \langle \textbf{int} \rangle\hat{}\gamma 2$ OK

$\Gamma \ \vdash \ y : \langle \textbf{int} \rangle\hat{}\gamma 1$ NG

$\Gamma \ \vdash \ x \underline{+} y : \langle \textbf{int} \rangle\hat{}\gamma 1$ NG

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:

$$\Gamma = \gamma 2 \geq \gamma 1,\ x : \langle \textbf{int} \rangle\hat{}\gamma 1,\ y : \langle \textbf{int} \rangle\hat{}\gamma 2$$

$$\Gamma \ \vdash \ x : \langle \textbf{int} \rangle\hat{}\gamma 2 \quad \textcolor{red}{\text{OK}}$$
$$\Gamma \ \vdash \ y : \langle \textbf{int} \rangle\hat{}\gamma 1 \quad \textcolor{red}{\text{NG}}$$
$$\Gamma \ \vdash \ x \underline{+} y : \langle \textbf{int} \rangle\hat{}\gamma 1 \quad \textcolor{red}{\text{NG}}$$
$$\Gamma \ \vdash \ x \underline{+} y : \langle \textbf{int} \rangle\hat{}\gamma 2 \quad \textcolor{red}{\text{OK}}$$

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:

$$\Gamma = \gamma 2 \geq \gamma 1,\ x : \langle \textbf{int} \rangle\,\hat{}\,\gamma 1,\ y : \langle \textbf{int} \rangle\,\hat{}\,\gamma 2$$

$$\Gamma \ \vdash \ x : \langle \textbf{int} \rangle\,\hat{}\,\gamma 2 \quad \text{OK}$$
$$\Gamma \ \vdash \ y : \langle \textbf{int} \rangle\,\hat{}\,\gamma 1 \quad \text{NG}$$
$$\Gamma \ \vdash \ x \underline{+} y : \langle \textbf{int} \rangle\,\hat{}\,\gamma 1 \quad \text{NG}$$
$$\Gamma \ \vdash \ x \underline{+} y : \langle \textbf{int} \rangle\,\hat{}\,\gamma 2 \quad \text{OK}$$

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:

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

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

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.**

環境識別子 (EC) の問題点

コード生成前・後でスコープの包含関係が逆転

コード生成器：

for $x = e1$ **to** $e2$ **do**
$\gamma 0$ **reset0** **for** $y = e3$ **to** $e4$ **do**
$\gamma 1$ **shift0** $k \rightarrow$ **let** $u = cc$ **in**
$\gamma 2$ **throw** k
$\gamma 3$ **set** $a\ (x, y)\ u$

コード生成前・後でスコープの包含関係が逆転

コード生成器：

for $x = e1$ **to** $e2$ **do**

$\gamma 0$ reset0 **for** $y = e3$ **to** $e4$ **do**

$\gamma 1$ shift0 $k \to$ **let** $u = cc$ in

$\gamma 2$ throw k

$\gamma 3$ **set** $a\ (x, y)\ u$

生成コード：

for $x' = e1'$ to $e2'$ do

$\gamma 0$ let $u' = cc'$ in

$\gamma 2$ for $y' = e3'$ to $e4'$ do

$\gamma 1$

$\gamma 3$ $a[(x', y')] \leftarrow u'$

コード生成前・後でスコープの包含関係が逆転

コード生成器：

スコープ	使えるコード変数
$\gamma 0$	x
$\gamma 1$	x,y
$\gamma 2$	x,y,u
$\gamma 3$	x,y,u

生成コード：

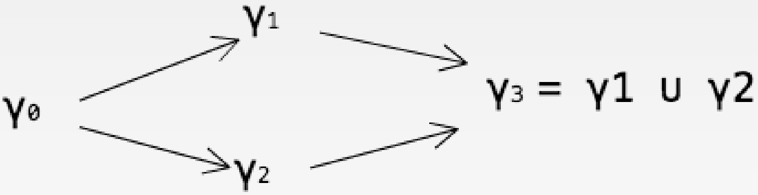
スコープ	使えるコード変数
$\gamma 0$	x
$\gamma 1$	x,u
$\gamma 2$	x,y,u
$\gamma 3$	x,y,u

- 生成前と生成後の $\gamma 1$ と $\gamma 2$ の間には順序関係がない

本研究の解決策 EC のジョイン

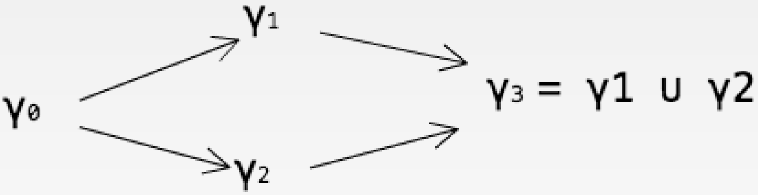
$$
\begin{tikzcd}
 & \gamma_1 \arrow[dr] & \\
\gamma_0 \arrow[ur] \arrow[dr] & & \gamma_3 = \gamma 1 \cup \gamma 2 \\
 & \gamma_2 \arrow[ur] &
\end{tikzcd}
$$

本研究の解決策 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

本研究の解決策 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)

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

4 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)**