安全なコード移動が可能な
コード生成言語の型システムの設計と実装

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

2017/1/27

筑波大学修論審査会

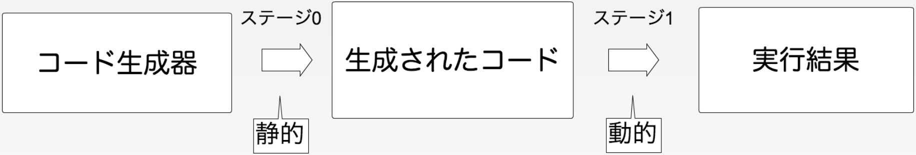
アウトライン

1. 準備
2. 問題点
3. 研究の目的，概要
4. 解決策
5. まとめと今後の課題

アウトライン

1. 準備
2. 問題点
3. 研究の目的，概要
4. 解決策
5. まとめと今後の課題

コード生成



- **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)**

コード生成言語による記述例

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

コード生成言語による記述例

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

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

let 挿入 (コード移動) 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) ○ cc

$\rightsquigarrow^*$

生成されるコード

<**let** u' $=$ cc$'$ **in**

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

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

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

let 挿入 (コード移動) の実現方法

コード生成器

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

$\rightsquigarrow^*$

生成されるコード

<**let** u' $=$ cc' **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 shift0/reset0 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** **for** $x = e1$ **to** $e2$ **do**
for $y = e3$ **to** $e4$ **do**
set $a\ (x, y)$ **shift0** $k \rightarrow$ **let** $u = cc$ **in** **throw** $k\ u$

shift0/reset0 による let 挿入

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

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

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

コード生成器:

$$\underline{\textbf{let}}\ u = cc\ \underline{\textbf{in}}\ \textbf{throw}\ k\ u$$

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

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

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

shift0/reset0 による let 挿入

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

コード生成器:

$$\underline{\textbf{let}}\ u = cc\ \underline{\textbf{in}}\ \textbf{throw}\ k\ u$$

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

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

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

生成コード: $<$ **let** $u' = cc'$ **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

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

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

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

$\underline{\textbf{set}}\ a\ (x, y)\ \textbf{shift0}\ k_1 \to \underline{\textbf{let}}\ u = cc1\ \underline{\textbf{in}}\ \textbf{throw}\ k_1\ u;$

$\underline{\textbf{set}}\ b\ (x, y)\ \textbf{shift0}\ k_1 \to\ \textbf{shift0}\ k_2 \to$

$\underline{\textbf{let}}\ w = cc2\ \underline{\textbf{in}}\ \textbf{throw}\ k_2(\textbf{throw}\ k_1\ w)$

shift0/reset0 による多段階 let 挿入

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

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

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

$\underline{\textbf{set}}\ a\ (x, y)\ \textbf{shift0}\ k_1 \to \underline{\textbf{let}}\ u = cc1\ \underline{\textbf{in}}\ \textbf{throw}\ k_1\ u;$

$\underline{\textbf{set}}\ b\ (x, y)\ \textbf{shift0}\ k_1 \to\ \textbf{shift0}\ k_2 \to$

$\underline{\textbf{let}}\ w = cc2\ \underline{\textbf{in}}\ \textbf{throw}\ k_2 (\textbf{throw}\ k_1\ w)$

生成コード: $<\ \textbf{let}\ w' \ = \ cc2'\ \textbf{in}$

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

$\textbf{let}\ u' \ = \ cc1'\ \textbf{in}$

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

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

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

アウトライン

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** $a\ (x, y)\ u$

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

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** $a\ (x, y)\ u$

$$\gamma 3 \geq \gamma 2 \geq \gamma 1 \geq \gamma 0$$

< **for** $x' = e1'$ **to** $e2'$ **do**
$\gamma 0$ **let** $u' = cc'$ **in**
$\gamma 2$ **for** $y' = e3'$ **to** $e4'$ **do**
$\gamma 1$
$\gamma 3$ $a[(x', y')] \leftarrow u'$ >

$$\gamma 3 \geq \gamma 1 \geq \gamma 2 \geq \gamma 0$$

アウトライン

研究の目的，概要

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，概要

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

概要

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

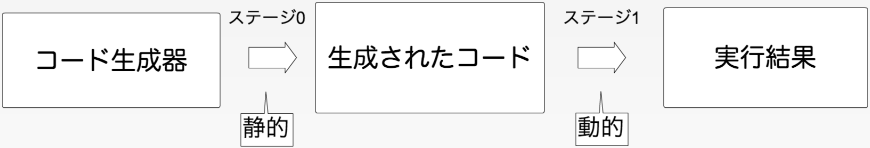
- コントロールオペレータ shift0/reset0 を利用し，let 挿入などのコード生成技法を表現
- 型システムを構築して型安全性を保証

アウトライン

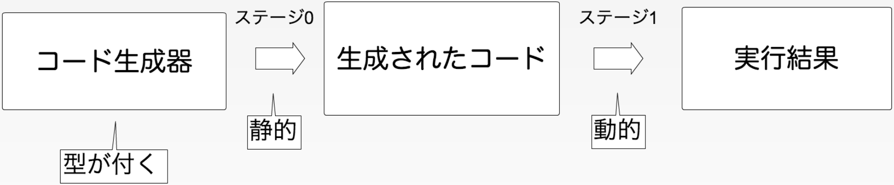
1. 準備
2. 問題点
3. 研究の目的，概要
4. **解決策**
5. まとめと今後の課題

解決策

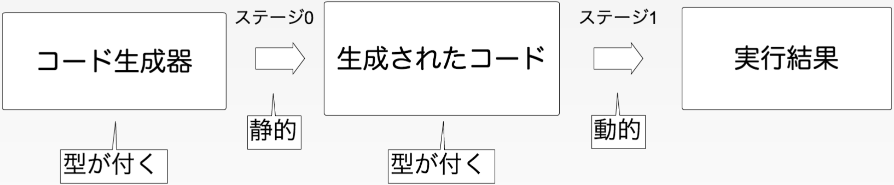
コード生成前に型付け，生成後のコードの型安全性を保証



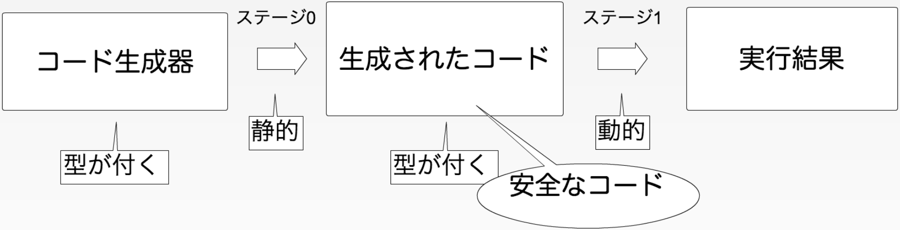
コード生成前に型付け，生成後のコードの型安全性を保証



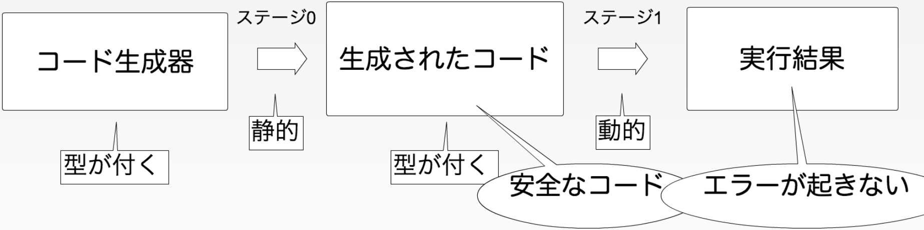
コード生成前に型付け，生成後のコードの型安全性を保証



コード生成前に型付け，生成後のコードの型安全性を保証



コード生成前に型付け，生成後のコードの型安全性を保証



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** $a\ (x, y)\ cc$

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

$$\gamma 2 \geq \gamma 1 \geq \gamma 0$$

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:

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

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

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

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

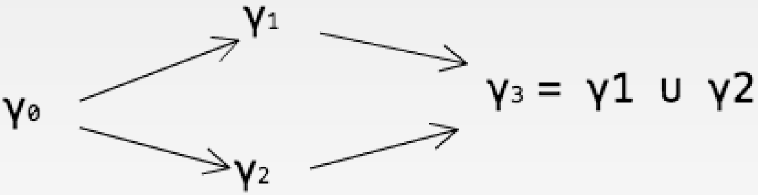
- 局所的なスコープをもつ破壊的変数をもつコード生成の体系に対する (型安全な) 型システムの構築 [Sudo,Kiselyov,Kameyama 2014]
- グローバルなスコープをもつ破壊的変数への拡張 [Kiselyov,Kameyama,Sudo 2016]

○ コントロールオペレータには非対応

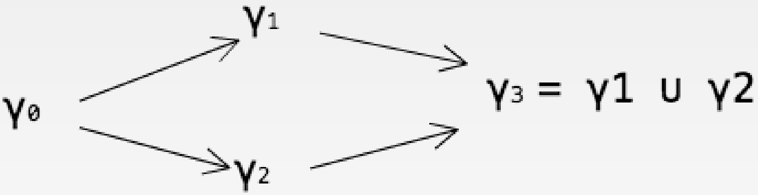
問題点:

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.

本研究の解決策

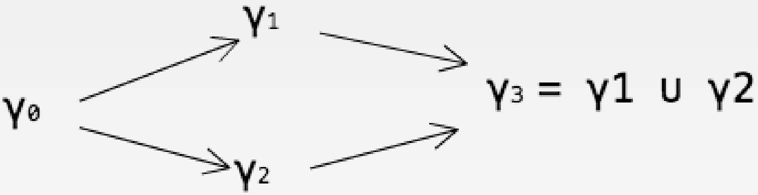


本研究の解決策



- $\gamma 1$ のコード変数は $\gamma 2$ では使ってはいけない
- $\gamma 2$ のコード変数は $\gamma 1$ では使ってはいけない

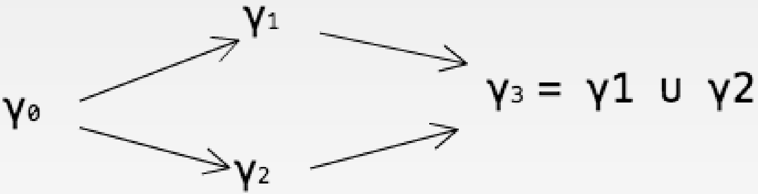
本研究の解決策



- $\gamma 1$ のコード変数は $\gamma 2$ では使ってはいけない
- $\gamma 2$ のコード変数は $\gamma 1$ では使ってはいけない

$\Rightarrow$ **$\gamma 1$ と $\gamma 2$ の間に順序を付けない**

本研究の解決策

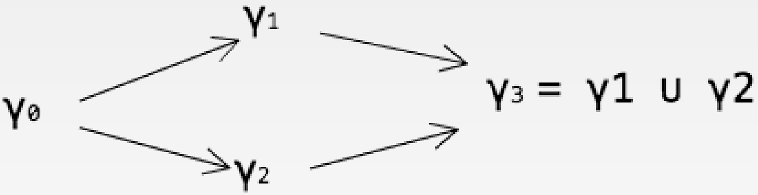


- $\gamma1$ のコード変数は $\gamma2$ では使ってはいけない
- $\gamma2$ のコード変数は $\gamma1$ では使ってはいけない

$\Rightarrow$ $\gamma1$ と $\gamma2$ の間に順序を付けない

- $\gamma1, \gamma2$ のコード変数は $\gamma3$ で使ってよい

本研究の解決策



- $\gamma 1$ のコード変数は $\gamma 2$ では使ってはいけない
- $\gamma 2$ のコード変数は $\gamma 1$ では使ってはいけない

$\Rightarrow$ $\gamma 1$ と $\gamma 2$ の間に順序を付けない

- $\gamma 1, \gamma 2$ のコード変数は $\gamma 3$ で使ってよい

$\Rightarrow$ Sudo らの体系に $\cup$ (ユニオン) を追加

コード生成+shift0/reset0 の型システム (の一部)

reset0:

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

shift0:

$$\frac{\Gamma,\ k : \langle t1 \rangle\hat{}\gamma1 \Rightarrow \langle t0 \rangle\hat{}\gamma0 \vdash e : \langle t0 \rangle\hat{}{\color{red}\gamma0}\ ;\ \sigma \quad \Gamma \models \gamma1 \geq \gamma0}{\Gamma \vdash \textbf{shift0}\ k \to e : \langle t1 \rangle\hat{}{\color{red}\gamma1}\ ;\ \langle t0 \rangle\hat{}\gamma0, \sigma}$$

throw:

$$\frac{\Gamma \vdash v : \langle t1 \rangle\hat{}{\color{red}\gamma1 \cup \gamma2}\ ;\ \sigma \quad \Gamma \models \gamma2 \geq \gamma0}{\Gamma,\ k : \langle t1 \rangle\hat{}\gamma1 \Rightarrow \langle t0 \rangle\hat{}\gamma0 \vdash \textbf{throw}\ k\ v : \langle t0 \rangle\hat{}\gamma2\ ;\ \sigma}$$

型付けの例 (1)

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

$$
\textbf{shift0}\ k\ \ \rightarrow\ \ \underline{\textbf{let}}\ u = \boxed{}\ \underline{\textbf{in}}\ \textbf{throw}\ k\ u)
$$

$$
\dfrac{\dfrac{\dfrac{\dfrac{\dfrac{\Gamma b \vdash u : \langle t\rangle\hat{}\,\gamma1 \cup \gamma2;\ \sigma}{\Gamma b \vdash \textbf{throw}\ k\ u : \langle t\rangle\hat{}\,\gamma2;\ \epsilon} \quad \dfrac{\vdots}{\Gamma a \vdash \boxed{} : \langle t\rangle\hat{}\,\gamma0;\ \epsilon}}{\Gamma a \vdash \underline{\textbf{let}}\ u = \ldots : \langle t\rangle\hat{}\,\gamma0;\ \epsilon}\ (\gamma2^*)}{\gamma1 \geq \gamma0,\ x : \langle t\rangle\hat{}\,\gamma1 \vdash \textbf{shift0}\ k\ \rightarrow\ \ldots : \langle t\rangle\hat{}\,\gamma1;\ \langle t\rangle\hat{}\,\gamma0}}{\vdash \underline{\textbf{for}}\ x = \ldots : \langle t\rangle\hat{}\,\gamma0;\ \langle t\rangle\hat{}\,\gamma0}\ (\gamma1^*)}{\vdash e : \langle t\rangle\hat{}\,\gamma0;\ \epsilon}
$$

$$
\Gamma a = \gamma1 \geq \gamma0,\ x : \langle t\rangle\hat{}\,\gamma1,\ k : \langle t\rangle\hat{}\,\gamma1 \Rightarrow \langle t\rangle\hat{}\,\gamma0
$$

$$
\Gamma b = \Gamma a,\ \gamma2 \geq \gamma0,\ u : \langle t\rangle\hat{}\,\gamma2
$$

型付けの例 (1)

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

$$\textbf{shift0}\ k\ \ \rightarrow\ \ \underline{\textbf{let}}\ u = \boxed{\underline{\textbf{int}}\ 3}\ \ \underline{\textbf{in}}\ \textbf{throw}\ k\ u)$$

$$\dfrac{\dfrac{\dfrac{\dfrac{\overline{\Gamma b \vdash u : \langle t \rangle\hat{}\,\gamma 1 \cup \gamma 2;\ \sigma}}{\Gamma b \vdash \textbf{throw}\ k\ u : \langle t \rangle\hat{}\,\gamma 2;\ \epsilon} \quad \dfrac{\vdots}{\Gamma a \vdash \boxed{\underline{\textbf{int}}\ 3} : \langle t \rangle\hat{}\,\gamma 0;\ \epsilon}}{\Gamma a \vdash \underline{\textbf{let}}\ u = \ldots : \langle t \rangle\hat{}\,\gamma 0;\ \epsilon}\ (\gamma 2^*)}{\gamma 1 \geq \gamma 0,\ x : \langle t \rangle\hat{}\,\gamma 1 \vdash \textbf{shift0}\ k\ \rightarrow\ \ldots : \langle t \rangle\hat{}\,\gamma 1;\ \langle t \rangle\hat{}\,\gamma 0}\ (\gamma 1^*)}{\vdash \underline{\textbf{for}}\ x = \ldots : \langle t \rangle\hat{}\,\gamma 0;\ \langle t \rangle\hat{}\,\gamma 0}}{\vdash e : \langle t \rangle\hat{}\,\gamma 0;\ \epsilon}$$

$$\Gamma a = \gamma 1 \geq \gamma 0,\ x : \langle t \rangle\hat{}\,\gamma 1,\ k : \langle t \rangle\hat{}\,\gamma 1 \Rightarrow \langle t \rangle\hat{}\,\gamma 0$$

$$\Gamma b = \Gamma a,\ \gamma 2 \geq \gamma 0,\ u : \langle t \rangle\hat{}\,\gamma 2$$

型付けの例 (1)

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

$$\textbf{shift0}\ k\ \rightarrow\ \underline{\textbf{let}}\ u = \boxed{\color{red}{x \ \underline{+}\ (\underline{\textbf{int}}\ 3)}}\ \underline{\textbf{in}}\ \textbf{throw}\ k\ u)$$

$$\dfrac{\dfrac{\dfrac{\dfrac{\overline{\Gamma b \vdash u : \langle t\rangle\hat{\ }\gamma 1 \cup \gamma 2;\ \sigma}}{\Gamma b \vdash \textbf{throw}\ k\ u : \langle t\rangle\hat{\ }\gamma 2;\ \epsilon} \quad \Gamma a \vdash \boxed{\color{red}{x \ \underline{+}\ (\underline{\textbf{int}}\ 3)}} : \langle t\rangle\hat{\ }{\color{red}\gamma 0};\ \epsilon}{\Gamma a \vdash \underline{\textbf{let}}\ u = \ldots : \langle t\rangle\hat{\ }\gamma 0;\ \epsilon}\ (\gamma 2^*}{\gamma 1 \geq \gamma 0,\ x : \langle t\rangle\hat{\ }\gamma 1 \vdash \textbf{shift0}\ k\ \rightarrow\ \ldots : \langle t\rangle\hat{\ }\gamma 1;\ \langle t\rangle\hat{\ }\gamma 0}}{\vdash \underline{\textbf{for}}\ x = \ldots : \langle t\rangle\hat{\ }\gamma 0;\ \langle t\rangle\hat{\ }\gamma 0}\ {\color{blue}(\gamma 1^*)}}{\vdash e : \langle t\rangle\hat{\ }\gamma 0;\ \epsilon}$$

$$\Gamma a = \gamma 1 \geq \gamma 0,\ x : \langle t\rangle\hat{\ }{\color{red}\gamma 1},\ k : \langle t\rangle\hat{\ }\gamma 1 \Rightarrow \langle t\rangle\hat{\ }\gamma 0$$

$$\Gamma b = \Gamma a,\ \gamma 2 \geq \gamma 0,\ u : \langle t\rangle\hat{\ }\gamma 2$$

型付けの例 (2)

$$
\begin{aligned}
e' = {} & \mathbf{reset0}\ (\underline{\mathbf{for}}\ x = e1\ \underline{\mathbf{to}}\ e2\ \underline{\mathbf{do}}\ \mathbf{reset0}\ (\underline{\mathbf{for}}\ y = e3\ \underline{\mathbf{to}}\ e4\ \underline{\mathbf{do}} \\
& \quad \mathbf{shift0}\ k_2 \rightarrow\ \mathbf{shift0}\ k_1 \rightarrow\ \underline{\mathbf{let}}\ u = \Box\ \underline{\mathbf{in}}\ \mathbf{throw}\ k_1\ (\mathbf{throw}\ k_2\ e5)))
\end{aligned}
$$

$$
\dfrac{
\dfrac{
\dfrac{
\dfrac{
\dfrac{
\dfrac{
\dfrac{
\dfrac{
\dfrac{\vdots}{\Gamma e \vdash e5 : \langle t\rangle\hat{}\gamma 2 \cup \gamma 1 \cup \gamma 3;\quad \epsilon}
}{\Gamma e \vdash \mathbf{throw}\ k_2\ e5 : \langle t\rangle\hat{}\gamma 1 \cup \gamma 3;\quad \epsilon}
}{\Gamma e = \Gamma d, \gamma 3 \geq \gamma 0, u : \langle t\rangle\hat{}\gamma 3 \vdash \mathbf{throw}\ k_1\ \ldots : \langle t\rangle\hat{}\gamma 3;\ \epsilon}
\quad
\dfrac{\vdots}{\Gamma d \vdash \Box : \langle t\rangle\hat{}\gamma 0; \epsilon}
}{\Gamma d = \Gamma c, k_1 : \langle t\rangle\hat{}\gamma 1 \Rightarrow \langle t\rangle\hat{}\gamma 0 \vdash \underline{\mathbf{let}}\ u = \ldots : \langle t\rangle\hat{}\gamma 0;\ \epsilon}\ (\gamma 3^*)
}{\Gamma c = \Gamma b, k_2 : \langle t\rangle\hat{}\gamma 2 \Rightarrow \langle t\rangle\hat{}\gamma 1 \vdash \mathbf{shift0}\ k_1 \ldots : \langle t\rangle\hat{}\gamma 1;\quad \langle t\rangle\hat{}\gamma 0}
}{\Gamma b = \Gamma a, \gamma 2 \geq \gamma 1,\ y : \langle t\rangle\hat{}\gamma 2 \vdash \mathbf{shift0}\ k_2 \ldots : \langle t\rangle\hat{}\gamma 2;\quad \langle t\rangle\hat{}\gamma 1, \langle t\rangle\hat{}\gamma 0}
}{\Gamma a \vdash \underline{\mathbf{for}}\ y = \ldots : \langle t\rangle\hat{}\gamma 1;\quad \langle t\rangle\hat{}\gamma 1, \langle t\rangle\hat{}\gamma 0}\ (\gamma 2^*)
}{\Gamma a = \gamma 1 \geq \gamma 0,\ x : \langle t\rangle\hat{}\gamma 1 \vdash \mathbf{reset0} \cdots : \langle t\rangle\hat{}\gamma 1;\quad \langle t\rangle\hat{}\gamma 0}
}{\vdash \underline{\mathbf{for}}\ x = \ldots : \langle t\rangle\hat{}\gamma 0;\quad \langle t\rangle\hat{}\gamma 0}\ (\gamma 1^*)
}{\vdash e' = \mathbf{reset0} \cdots : \langle t\rangle\hat{}\gamma 0;\quad \epsilon}
$$

型推論アルゴリズム

- 制約生成
- 制約解消

制約生成

こういう制約が出てくる

制約解消

先の制約を解消して，型を決定する

アウトライン

まとめと今後の課題

まとめ

- コード生成言語にコード移動を許す仕組み (shift0/reset0) を導入し，その安全性を保証するための型システムの設計を行い
  - 安全性：Scope extrusion が起きないようにする
- 型推論アルゴリズムの開発を行った

今後の課題

- 設計した型システムの健全性の証明（Subject reduction）
- 型推論アルゴリズム (制約解消) の実装
- 言語の拡張
  - グローバルな参照 (OCaml の ref)
  - 生成したコードの実行 (MetaOCaml の run)