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

指導教員 亀山幸義

筑波大学 コンピュータサイエンス専攻

2017/1/27

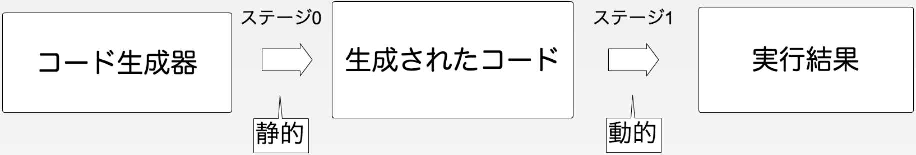
筑波大学修論審査会

アウトライン

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

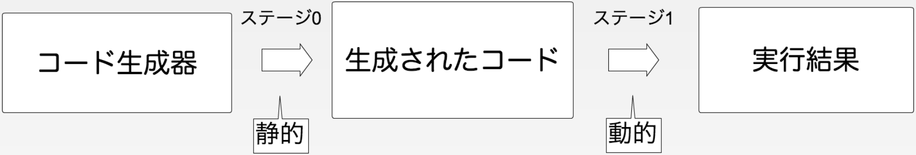
アウトライン

目的



- 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**)

目的

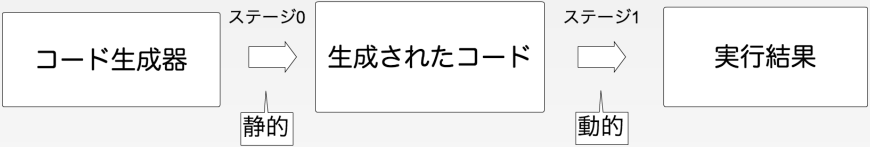


- **コード生成をサポートするプログラム言語 (=コード生成言語)**

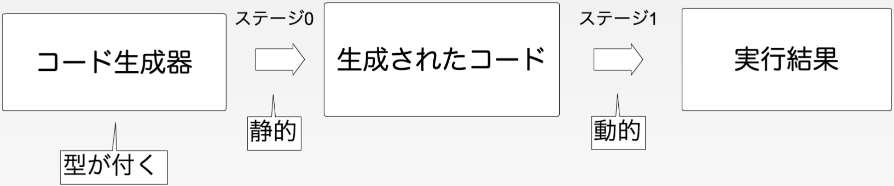
表現力と安全性を兼ね備えたコード生成言語の構築

- **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**

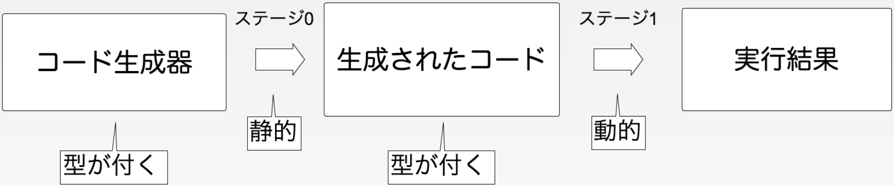
コード生成前に型付け，生成後のコードの型安全性を保証



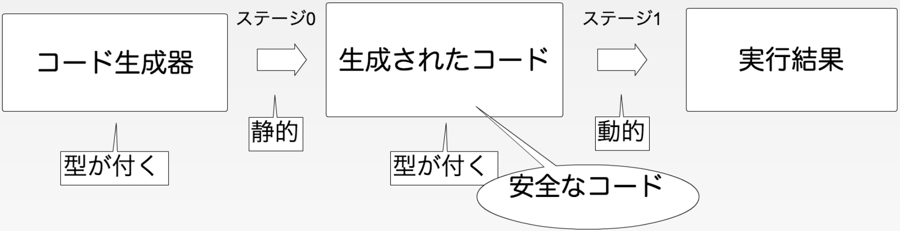
コード生成前に型付け，生成後のコードの型安全性を保証



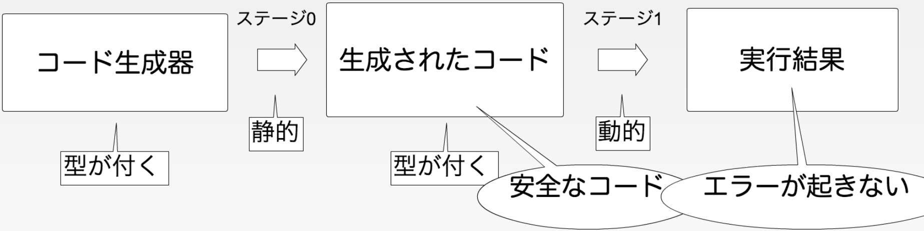
コード生成前に型付け，生成後のコードの型安全性を保証



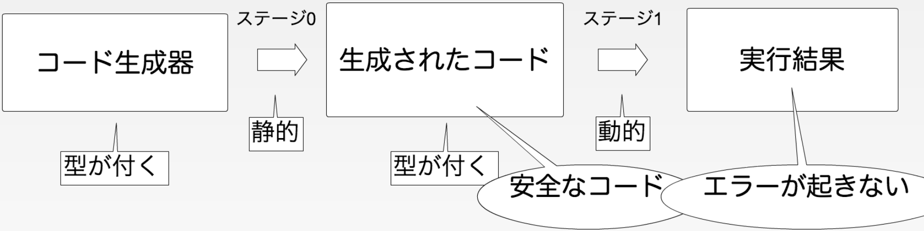
コード生成前に型付け，生成後のコードの型安全性を保証



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



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



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，多段階** 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. 目的
2. **準備**
3. 問題点
4. 解決策
5. まとめと今後の課題

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
$(\underline{\textsf{int}}\ \ 3)$	$\rightsquigarrow^*$	$\textsf{<}3\textsf{>}$
$(\underline{\textsf{int}}\ \ 3)\ \underline{+}\ (\underline{\textsf{int}}\ \ 5)$	$\rightsquigarrow^*$	$\textsf{<}3+5\textsf{>}$
$\underline{\lambda} x.\ x\ \underline{+}\ (\underline{\textsf{int}}\ \ 3)$	$\rightsquigarrow^*$	$\textsf{<}\lambda x'.x'+3\textsf{>}$
$\underline{\textsf{for}}\ x = \cdots\ \underline{\textsf{to}}\ \cdots\ \underline{\textsf{do}}\ \ \cdots$	$\rightsquigarrow^*$	$\textsf{<}\textsf{for}\ x' = \cdots\ \textsf{to}\ \cdots\ \textsf{do}\ \ \cdots\textsf{>}$

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

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

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

$\underline{\textbf{set}}$ <a> (x, y) $\circ$

$\underline{\textbf{let}}\ u\ =\ \mathsf{cc}\ \underline{\textbf{in}} \circ$ u

$\rightsquigarrow^*$

生成されるコード

<**let** $u'\ =\ \mathsf{cc}'$ **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

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

$\rightsquigarrow^*$

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 等を用いることで，多段階 let 挿入を行う

アウトライン

コード生成前後でコードが移動する

コード生成器

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

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

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

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

$\rightsquigarrow^*$

生成されるコード

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

$\quad \textbf{let}\ u' = y'\ \textbf{in}$

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

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

コード生成前後でコードが移動する

コード生成器

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

$\rightsquigarrow^*$

生成されるコード

$<\ \textbf{for}\ x' = e1'\ \textbf{to}\ e2'\ \textbf{do}$
$\quad \textbf{let}\ u' = y'\ \textbf{in}$
$\quad\quad \textbf{for}\ y' = e3'\ \textbf{to}\ e4'\ \textbf{do}$
$\quad\quad\quad a[(x', y')] \leftarrow u'\ >$

Scope Extrusion

(コード移動により) 意図した束縛から，変数が抜け出てしまうこと

アウトライン

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

解決策

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

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.

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:

$$\frac{\Gamma,\ k : \langle t1 \rangle \hat{}\, \gamma 1 \Rightarrow \langle t0 \rangle \hat{}\, \gamma 0 \vdash e : \langle t0 \rangle \hat{}\, {\color{red}\gamma 0} \ ; \ \sigma \qquad \Gamma \models \gamma 1 \geq \gamma 0}{\Gamma \vdash \textbf{shift0}\ k \to e : \langle t1 \rangle \hat{}\, {\color{red}\gamma 1} \ ; \ \langle t0 \rangle \hat{}\, \gamma 0, \sigma}$$

throw:

$$\frac{\Gamma \vdash v : \langle t1 \rangle \hat{}\, {\color{red}\gamma 1 \cup \gamma 2} \ ; \ \sigma \qquad \Gamma \models \gamma 2 \geq \gamma 0}{\Gamma,\ k : \langle t1 \rangle \hat{}\, \gamma 1 \Rightarrow \langle t0 \rangle \hat{}\, \gamma 0 \vdash \textbf{throw}\ k\ v : \langle t0 \rangle \hat{}\, \gamma 2 \ ; \ \sigma}$$

型付けの例 (1)

$$
\begin{array}{l}
e = \textbf{reset0}\ \ (\underline{\textbf{for}}\ x = e1\ \underline{\textbf{to}}\ e2\ \underline{\textbf{do}} \\
\qquad\qquad \textbf{shift0}\ k\ \ \rightarrow\ \ \underline{\textbf{let}}\ u = \boxed{}\ \underline{\textbf{in}}\ \textbf{throw}\ k\ u)
\end{array}
$$

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

$$
\begin{array}{l}
\Gamma a = \gamma1 \geq \gamma0,\ \ x : \langle t\rangle\hat{}{\color{red}\gamma1},\ \ k : \langle t\rangle\hat{}\gamma1 \Rightarrow \langle t\rangle\hat{}\gamma0 \\
\Gamma b = \Gamma a,\ \ \gamma2 \geq \gamma0,\ \ u : \langle t\rangle\hat{}\gamma2
\end{array}
$$

型付けの例 (1)

$$e = \textbf{reset0}\ \ (\underline{\textbf{for}}\ x = e1\ \underline{\textbf{to}}\ e2\ \underline{\textbf{do}}$$
$$\textbf{shift0}\ k\ \rightarrow\ \underline{\textbf{let}}\ u = \boxed{\underline{\textbf{int}}\ 3}\ \underline{\textbf{in}}\ \textbf{throw}\ k\ u)$$

$$
\dfrac{
  \dfrac{
    \dfrac{
      \dfrac{}{\Gamma b \vdash u : \langle t\rangle\hat{}\,\gamma1 \cup \gamma2;\ \sigma}
    }{\Gamma b \vdash \textbf{throw}\ k\ u : \langle t\rangle\hat{}\,\gamma2;\ \epsilon}
    \quad
    \dfrac{\vdots}{\Gamma a \vdash \boxed{\underline{\textbf{int}}\ 3} : \langle t\rangle\hat{}\,\gamma0;\ \epsilon}
  }{\Gamma a \vdash \underline{\textbf{let}}\ u = \ldots : \langle t\rangle\hat{}\,\gamma0;\ \epsilon}\ (\gamma2^*)
}{
  \dfrac{\gamma1 \geq \gamma0,\ x : \langle t\rangle\hat{}\,\gamma1 \vdash \textbf{shift0}\ k\ \rightarrow\ \ldots : \langle t\rangle\hat{}\,\gamma1;\ \langle t\rangle\hat{}\,\gamma0}{
    \dfrac{\vdash \underline{\textbf{for}}\ x = \ldots : \langle t\rangle\hat{}\,\gamma0;\ \langle t\rangle\hat{}\,\gamma0}{\vdash e : \langle t\rangle\hat{}\,\gamma0;\ \epsilon}
  }\ (\gamma1^*)
}
$$

$$\Gamma a = \gamma1 \geq \gamma0,\ x : \langle t\rangle\hat{}\,\gamma1,\ k : \langle t\rangle\hat{}\,\gamma1 \Rightarrow \langle t\rangle\hat{}\,\gamma0$$
$$\Gamma b = \Gamma a,\ \gamma2 \geq \gamma0,\ u : \langle t\rangle\hat{}\,\gamma2$$

型付けの例 (1)

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

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

$$\dfrac{\dfrac{\dfrac{\dfrac{}{\Gamma b \vdash u : \langle t\rangle\hat{}\gamma1 \cup \gamma2;\ \sigma}}{\Gamma b \vdash \mathbf{throw}\ k\ u : \langle t\rangle\hat{}\gamma2;\ \epsilon} \quad \begin{array}{c}\vdots \\ \Gamma a \vdash \boxed{\ x\ \underline{+}\ (\underline{\mathbf{int}}\ 3)\ } : \langle t\rangle\hat{}\gamma0;\ \epsilon\end{array}}{\Gamma a \vdash \underline{\mathbf{let}}\ u = \ldots : \langle t\rangle\hat{}\gamma0;\ \epsilon}\ (\gamma2^*}{\dfrac{\gamma1 \geq \gamma0,\ x : \langle t\rangle\hat{}\gamma1 \vdash \mathbf{shift0}\ k\ \rightarrow\ \ldots : \langle t\rangle\hat{}\gamma1;\ \langle t\rangle\hat{}\gamma0}{\vdash \underline{\mathbf{for}}\ x = \ldots : \langle t\rangle\hat{}\gamma0;\ \langle t\rangle\hat{}\gamma0}\ (\gamma1^*)}}{\vdash e : \langle t\rangle\hat{}\gamma0;\ \epsilon}$$

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

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

型付けの例 (2)

$$e' = \textbf{reset0}\ (\underline{\textbf{for}}\ x = e1\ \underline{\textbf{to}}\ e2\ \underline{\textbf{do}}\ \textbf{reset0}\ (\underline{\textbf{for}}\ y = e3\ \underline{\textbf{to}}\ e4\ \underline{\textbf{do}}$$

$$\textbf{shift0}\ k_2 \to\ \textbf{shift0}\ k_1 \to\ \underline{\textbf{let}}\ u = \boxed{}\ \underline{\textbf{in}}\ \textbf{throw}\ k_1\ (\textbf{throw}\ k_2\ e5)))$$

$$\vdots$$

$$\Gamma e \vdash e5 : \langle t\rangle\hat{}\gamma2 \cup \gamma1 \cup \gamma3;\quad \epsilon$$

$$\Gamma e \vdash \textbf{throw}\ k_2\ e5 : \langle t\rangle\hat{}\gamma1 \cup \gamma3;\quad \epsilon \qquad \vdots$$

$$\Gamma e = \Gamma d, \gamma3 \geq \gamma0, u : \langle t\rangle\hat{}\gamma3 \vdash \textbf{throw}\ k_1\ \ldots : \langle t\rangle\hat{}\gamma3;\ \epsilon \qquad \Gamma d \vdash \boxed{} : \langle t\rangle\hat{}\gamma0; \epsilon \qquad (\gamma$$

$$\Gamma d = \Gamma c, k_1 : \langle t\rangle\hat{}\gamma1 \Rightarrow \langle t\rangle\hat{}\gamma0 \vdash \underline{\textbf{let}}\ u = \ldots : \langle t\rangle\hat{}\gamma0;\ \epsilon$$

$$\Gamma c = \Gamma b, k_2 : \langle t\rangle\hat{}\gamma2 \Rightarrow \langle t\rangle\hat{}\gamma1 \vdash \textbf{shift0}\ k_1 \ldots : \langle t\rangle\hat{}\gamma1;\quad \langle t\rangle\hat{}\gamma0$$

$$\Gamma b = \Gamma a, \gamma2 \geq \gamma1,\ y : \langle t\rangle\hat{}\gamma2 \vdash \textbf{shift0}\ k_2 \ldots : \langle t\rangle\hat{}\gamma2;\quad \langle t\rangle\hat{}\gamma1, \langle t\rangle\hat{}\gamma0 \qquad (\gamma2^*)$$

$$\Gamma a \vdash \underline{\textbf{for}}\ y = \ldots : \langle t\rangle\hat{}\gamma1;\quad \langle t\rangle\hat{}\gamma1, \langle t\rangle\hat{}\gamma0$$

$$\Gamma a = \gamma1 \geq \gamma0,\ x : \langle t\rangle\hat{}\gamma1 \vdash \textbf{reset0} \cdots : \langle t\rangle\hat{}\gamma1;\quad \langle t\rangle\hat{}\gamma0 \qquad (\gamma1^*)$$

$$\vdash \underline{\textbf{for}}\ x = \ldots : \langle t\rangle\hat{}\gamma0;\quad \langle t\rangle\hat{}\gamma0$$

$$\vdash e' = \textbf{reset0} \cdots : \langle t\rangle\hat{}\gamma0;\quad \epsilon$$

$$\Gamma d = \cdots,\ x : \langle t\rangle\hat{}\gamma1,\ y : \langle t\rangle\hat{}\gamma2,\ \gamma1 \geq \gamma0,\ \gamma2 \geq \gamma1,\ \cdots$$

型付けの例 (2)

$$e' = \textbf{reset0}\ (\underline{\textbf{for}}\ x = e1\ \underline{\textbf{to}}\ e2\ \underline{\textbf{do}}\ \textbf{reset0}\ (\underline{\textbf{for}}\ y = e3\ \underline{\textbf{to}}\ e4\ \underline{\textbf{do}}$$

$$\textbf{shift0}\ k_2 \to\ \textbf{shift0}\ k_1 \to\ \underline{\textbf{let}}\ u = \boxed{x}\ \underline{\textbf{in}}\ \textbf{throw}\ k_1\ (\textbf{throw}\ k_2\ e5)))$$

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

$$\Gamma d = \cdots,\ x : \langle t\rangle\hat{}\gamma 1,\ y : \langle t\rangle\hat{}\gamma 2,\ \gamma 1 \geq \gamma 0,\ \gamma 2 \geq \gamma 1,\ \cdots$$

型付けの例 (2)

$$e' = \textbf{reset0}\ (\underline{\textbf{for}}\ x = e1\ \underline{\textbf{to}}\ e2\ \underline{\textbf{do}}\ \textbf{reset0}\ (\underline{\textbf{for}}\ y = e3\ \underline{\textbf{to}}\ e4\ \underline{\textbf{do}}$$

$$\textbf{shift0}\ k_2 \to\ \textbf{shift0}\ k_1 \to\ \underline{\textbf{let}}\ u = \boxed{\ y\ }\ \underline{\textbf{in}}\ \textbf{throw}\ k_1\ (\textbf{throw}\ k_2\ e5)))$$

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

$$\Gamma d = \cdots,\ x : \langle t\rangle\hat{}\,\gamma 1,\ y : \langle t\rangle\hat{}\,\gamma 2,\ \gamma 1 \geq \gamma 0,\ \gamma 2 \geq \gamma 1,\ \cdots$$

型推論アルゴリズム

型推論アルゴリズム

$\Gamma,\ L,\ \sigma,\ e$ が与えられたとき，$\Gamma \vdash^L e : t;\ \sigma$ が成立するような t があるかどうか判定し，その型 t を返す

制約生成

与えられた項に対して，型，EC，エフェクトに関する制約を返す

制約解消

その得られた制約を解消し，その制約を満たす代入 Θ を返す

制約生成

制約生成用の型システム T_2 の導入

subsumption 規則をあらゆる規則に付加させて型推論用 (制約を生成する) の型システムを作成．型付け規則を一意に適用できるようにした

型に関する順序 $t_1 \geq t_2$ の導入

制約生成時において，コード型か普通の型か判断することができないためその 2 つを同時に表す $\geq$ を導入した

制約解消

生成された制約 $\Delta \models C$
仮定 Δ

EC **に対する順序**	$d \geq e$

制約 C

型	$t0 = t1$	$t0 \geq t1$
EC	$\gamma 0 = \gamma 1$	$\gamma 0 \geq \gamma 1$
エフェクト (型の列)	$\sigma 0 = \sigma 1$	

制約に対する解の存在判定

型に対する単一化等をおこなう

ここでは，EC の不等式制約の解消について説明をする

制約解消：EC の不等式制約の解消

この時点で残る制約 $\Delta \models C$

- 仮定 Δ ： $d \geq e$ の有限集合 (d は EC 定数)
- 制約 C ： $e1 \geq e2$ の有限集合
- $e, e1, e2, \ldots$ EC を表す式 ： $e ::= d \mid x \mid e \cup e$

制約解消アルゴリズム (の一部)

$d1 \geq d1 \implies \Delta$ を使って判定

$e1 \geq e2 \cup e3 \implies e1 \geq e2$ かつ $e1 \geq e3$

$e1 \cup e2 \geq d \implies e1 \geq d$ または $e2 \geq d$

変数 x の除去 $[x := d1 \cup d2 \cup y]$

$$\begin{array}{ll} e1 \geq x & x \geq d1 \\ e2 \geq x & x \geq d2 \\ & x \geq y \end{array} \implies \begin{array}{ll} e1 \geq d1 & e2 \geq d1 \\ e1 \geq d2 & e2 \geq d2 \\ e1 \geq y & e2 \geq y \end{array}$$

アウトライン

1. 目的
2. 準備
3. 問題点
4. 解決策
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 (実装については制約生成まで)

今後の課題

- 設計した型システムの健全性の証明（Subject reduction）の完成
- 型推論アルゴリズム (制約解消) の実装の完成