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

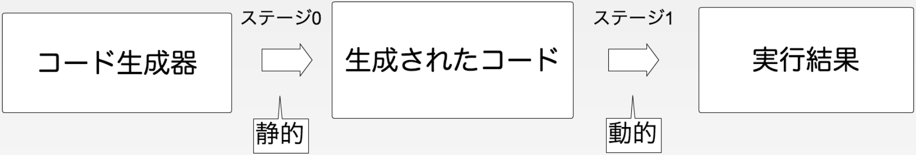
アウトライン

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

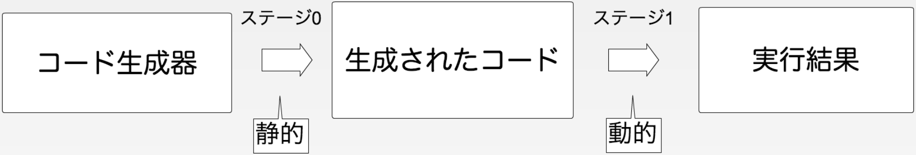
1. 目的
2. 準備
3. 問題点
4. 解決策
5. まとめと今後の課題

目的



- **コードを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

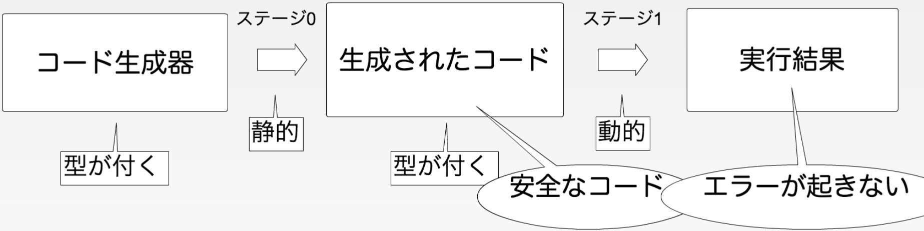


- **コード生成をサポートするプログラム言語**
  (=**コード生成言語**)

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



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

let 挿入 (コード移動) の実現方法

コード生成器

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

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

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

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

$\rightsquigarrow^*$

生成したいコード

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

$\quad\textbf{let}\ u'\ =\ \mathsf{cc}'\ \textbf{in}$

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

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

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

$\rightsquigarrow^*$

生成したいコード

<**for** $x' = e1'$ **to** $e2'$ **do**
  let u' $=$ cc$'$ **in**
    for $y' = e3'$ **to** $e4'$ **do**
      $a[x', y'] \leftarrow u'$>

shift0/reset0 の導入

shift0/reset0 等を用いることで，(多段階)let 挿入等を行う

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

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

生成されるコード

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

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

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:

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

throw:

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

型付けの例 (1)

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

$$
\begin{prooftree}
\AxiomC{}
\UnaryInfC{$\Gamma b \vdash u : \langle t\rangle\hat{}\,\gamma 1 \cup \gamma 2;\ \sigma$}
\UnaryInfC{$\Gamma b \vdash \textbf{throw}\ k\ u : \langle t\rangle\hat{}\,\gamma 2;\ \epsilon$}
\AxiomC{$\vdots$}
\UnaryInfC{$\Gamma a \vdash \boxed{} : \langle t\rangle\hat{}\,\gamma 0;\ \epsilon$}
\RightLabel{$(\gamma 2^*)$}
\BinaryInfC{$\Gamma a \vdash \underline{\textbf{let}}\ u = \ldots : \langle t\rangle\hat{}\,\gamma 0;\ \epsilon$}
\UnaryInfC{$\gamma 1 \geq \gamma 0,\ x : \langle t\rangle\hat{}\,\gamma 1 \vdash \textbf{shift0}\ k\ \rightarrow\ \ldots : \langle t\rangle\hat{}\,\gamma 1;\ \langle t\rangle\hat{}\,\gamma 0$}
\RightLabel{$(\gamma 1^*)$}
\UnaryInfC{$\vdash \underline{\textbf{for}}\ x = \ldots : \langle t\rangle\hat{}\,\gamma 0;\ \langle t\rangle\hat{}\,\gamma 0$}
\UnaryInfC{$\vdash e : \langle t\rangle\hat{}\,\gamma 0;\ \epsilon$}
\end{prooftree}
$$

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

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

型付けの例 (1)

$e =$ **reset0** **for** x = e1 **to** e2 **do** **shift0** k → **let** u= **int** 3 **in** **throw** k u

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

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

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

型付けの例 (1)

$e =$ **reset0** $\boxed{\textbf{for}\ \mathsf{x} = \mathsf{e1}\ \textbf{to}\ \mathsf{e2}\ \textbf{do}\ \boxed{\textbf{shift0}\ \mathsf{k} \rightarrow \boxed{\textbf{let}\ \mathsf{u}{=}\boxed{x}\ \textbf{in}\ \boxed{\textbf{throw}\ \mathsf{k}\ \boxed{\mathsf{u}}}}}}$

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

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

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

型付けの例 (2)

$$
e' = \textbf{reset0}\ (\underline{\textbf{for}}\ x = e1\ \underline{\textbf{to}}\ e2\ \underline{\textbf{do}}\ \textbf{reset0}\ (\underline{\textbf{for}}\ y = e3\ \underline{\textbf{to}}\ e4\ \underline{\textbf{do}}
$$
$$
\textbf{shift0}\ k_2 \to\ \textbf{shift0}\ k_1 \to\ \underline{\textbf{let}}\ u = \boxed{}\ \underline{\textbf{in}}\ \textbf{throw}\ k_1\ (\textbf{throw}\ k_2\ e5)))
$$

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

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

型付けの例 (2)

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

$$
\begin{array}{c}
\dfrac{\dfrac{\dfrac{\vdots}{\Gamma e \vdash e5 : \langle t\rangle\hat{}\gamma2 \cup \gamma1 \cup \gamma3;\quad \epsilon}}{\Gamma e \vdash \textbf{throw}\ k_2\ e5 : \langle t\rangle\hat{}\gamma1 \cup \gamma3;\quad \epsilon}}{\Gamma e = \Gamma d, \gamma3 \geq \gamma0, u : \langle t\rangle\hat{}\gamma3 \vdash \textbf{throw}\ k_1\ \ldots : \langle t\rangle\hat{}\gamma3;\ \epsilon}
\qquad
\dfrac{\vdots}{\Gamma d \vdash \boxed{x\quad} : \langle t\rangle\hat{}\gamma0; \epsilon}
\\ \hline
\Gamma d = \Gamma c, k_1 : \langle t\rangle\hat{}\gamma1 \Rightarrow \langle t\rangle\hat{}\gamma0 \vdash \underline{\textbf{let}}\ u = \ldots : \langle t\rangle\hat{}\gamma0;\ \epsilon
\\ \hline
\Gamma c = \Gamma b, k_2 : \langle t\rangle\hat{}\gamma2 \Rightarrow \langle t\rangle\hat{}\gamma1 \vdash \textbf{shift0}\ k_1 \ldots : \langle t\rangle\hat{}\gamma1;\quad \langle t\rangle\hat{}\gamma0
\\ \hline
\Gamma b = \Gamma a, \gamma2 \geq \gamma1,\ y : \langle t\rangle\hat{}\gamma2 \vdash \textbf{shift0}\ k_2 \ldots : \langle t\rangle\hat{}\gamma2;\quad \langle t\rangle\hat{}\gamma1, \langle t\rangle\hat{}\gamma0
\\ \hline
\Gamma a \vdash \underline{\textbf{for}}\ y = \ldots : \langle t\rangle\hat{}\gamma1;\quad \langle t\rangle\hat{}\gamma1, \langle t\rangle\hat{}\gamma0 \qquad (\gamma2^*)
\\ \hline
\Gamma a = \gamma1 \geq \gamma0,\ x : \langle t\rangle\hat{}\gamma1 \vdash \textbf{reset0} \cdots : \langle t\rangle\hat{}\gamma1;\quad \langle t\rangle\hat{}\gamma0
\\ \hline
\vdash \underline{\textbf{for}}\ x = \ldots : \langle t\rangle\hat{}\gamma0;\quad \langle t\rangle\hat{}\gamma0 \qquad (\gamma1^*)
\\ \hline
\vdash e' = \textbf{reset0} \cdots : \langle t\rangle\hat{}\gamma0;\quad \epsilon
\end{array}
$$

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

型付けの例 (2)

$e' =$ **reset0** (**for** $x = e1$ **to** $e2$ **do** **reset0** (**for** $y = e3$ **to** $e4$ **do**

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

$$
\dfrac{\dfrac{\dfrac{\dfrac{\dfrac{\dfrac{\dfrac{\dfrac{\Gamma e \vdash e5 : \langle t\rangle\hat{}\gamma2 \cup \gamma1 \cup \gamma3;\quad \epsilon}{\Gamma e \vdash \textbf{throw}\ k_2\ e5 : \langle t\rangle\hat{}\gamma1 \cup \gamma3;\quad \epsilon}}{\Gamma e = \Gamma d, \gamma3 \geq \gamma0, u : \langle t\rangle\hat{}\gamma3 \vdash \textbf{throw}\ k_1\ \ldots : \langle t\rangle\hat{}\gamma3;\ \epsilon} \quad \Gamma d \vdash \boxed{y} : \langle t\rangle\hat{}\gamma0; \epsilon}{\Gamma d = \Gamma c, k_1 : \langle t\rangle\hat{}\gamma1 \Rightarrow \langle t\rangle\hat{}\gamma0 \vdash \textbf{let}\ u = \ldots : \langle t\rangle\hat{}\gamma0;\ \epsilon}}{\Gamma c = \Gamma b, k_2 : \langle t\rangle\hat{}\gamma2 \Rightarrow \langle t\rangle\hat{}\gamma1 \vdash \textbf{shift0}\ k_1 \ldots : \langle t\rangle\hat{}\gamma1;\quad \langle t\rangle\hat{}\gamma0}}{\Gamma b = \Gamma a, \gamma2 \geq \gamma1,\ y : \langle t\rangle\hat{}\gamma2 \vdash \textbf{shift0}\ k_2 \ldots : \langle t\rangle\hat{}\gamma2;\quad \langle t\rangle\hat{}\gamma1, \langle t\rangle\hat{}\gamma0}}{\Gamma a \vdash \textbf{for}\ y = \ldots : \langle t\rangle\hat{}\gamma1;\quad \langle t\rangle\hat{}\gamma1, \langle t\rangle\hat{}\gamma0}\ (\gamma2^*)}{\Gamma a = \gamma1 \geq \gamma0,\ x : \langle t\rangle\hat{}\gamma1 \vdash \textbf{reset0} \cdots : \langle t\rangle\hat{}\gamma1;\quad \langle t\rangle\hat{}\gamma0}}{\vdash \textbf{for}\ x = \ldots : \langle t\rangle\hat{}\gamma0;\quad \langle t\rangle\hat{}\gamma0}\ (\gamma1^*)}{\vdash e' = \textbf{reset0} \cdots : \langle t\rangle\hat{}\gamma0;\quad \epsilon}
$$

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

型推論アルゴリズム

型推論アルゴリズム

$\Gamma,\ L,\ \sigma,\ t,\ e$ が与えられたとき，$\Theta(\Gamma \vdash^{L} e : t;\ \sigma)$ が成立するような代入 Θ があるかどうか判定する

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 または fail を返す

制約生成

制約生成用の型システム T_2

$$\frac{\Gamma \vdash x : \mathtt{int}; \sigma \quad \Gamma \vdash y : \mathtt{int}; \sigma}{\Gamma \vdash x \mathbin{\textbf{+}} y : t; \sigma}\ \mathit{Constr};\ t = \mathtt{int}$$

$$\frac{\Gamma \vdash u : \langle \mathtt{int} \rangle^{\gamma}; \sigma \quad \Gamma \vdash w : \langle \mathtt{int} \rangle^{\gamma}; \sigma}{\Gamma \vdash u \mathbin{\underline{\textbf{+}}} w : t; \sigma}\ \mathit{Constr};\ \Gamma \models t \geq \langle \mathtt{int} \rangle^{\gamma}$$

- 下から上に一意的に適用
- 規則適用時に制約を生成

型に関する順序 $t_1 \geq t_2$

コード型か普通の型か判断できないため，型に関する順序 $\geq$ の導入を行った

制約解消

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，EC，**エフェクトに対する単一化等をおこなう**

制約解消

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，EC，エフェクト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の例

$$\underline{\lambda} x.(\underline{\textbf{int}}\ 1 \mathbin{\underline{+}} x) : t1$$

$$C = \{\gamma 2 \geq \gamma 3,\ \gamma 2 \geq d1,\ \gamma' \geq \gamma 1\}$$

$$\Theta = \{t1 := \langle t2 \to t3 \rangle\hat{\ }\gamma',\ t2 := \texttt{int},\ t3 := \texttt{int},\ t4 := \texttt{int},\ \gamma' := d0\}$$

EC の変数の除去を行う

制約解消：EC の不等式制約の解消の例

$$\underline{\lambda} x.(\underline{\textbf{int}}\ 1 \ \underline{+}\ x) : t1$$

$$C = \{\gamma 2 \geq \gamma 3,\ \gamma 2 \geq d1, \qquad\qquad \}$$
$$\Theta = \{t1 := \langle t2 \to t3 \rangle\hat{}\gamma',\ t2 := \texttt{int},\ t3 := \texttt{int},\ t4 := \texttt{int},$$
$$\gamma' := d0,\ \gamma 1 := d0\}$$

EC の変数の除去を行う

$\gamma 1$ **を選ぶ** C **から** $\gamma' \geq \gamma 1$ **を消去し** Θ **に代入** $\gamma 1 := d0$ **を追加**

制約解消：EC の不等式制約の解消の例

$$\underline{\lambda} x.(\underline{\textbf{int}}\ 1 \ \underline{+}\ x) : t1$$

$$C = \{\gamma 2 \geq \gamma 3, \qquad\qquad\qquad \}$$
$$\Theta = \{t1 := \langle t2 \to t3 \rangle\hat{}\,\gamma',\ t2 := \texttt{int},\ t3 := \texttt{int},\ t4 := \texttt{int},$$
$$\gamma' := d0,\ \gamma 1 := d0,\ \gamma 2 := d1\}$$

EC の変数の除去を行う

$\gamma 1$ **を選ぶ** C **から** $\gamma' \geq \gamma 1$ **を消去し** Θ **に代入** $\gamma 1 := d0$ **を追加**

$\gamma 2$ **を選ぶ** C **から** $\gamma 2 \geq d1$ **を消去し** Θ **に代入** $\gamma 2 := d1$ **を追加**

制約解消：EC の不等式制約の解消の例

$$\underline{\lambda} x.(\underline{\textbf{int}}\ 1 \underline{+} x) : t1$$

$$C = \{ \qquad \}$$

$$\Theta = \{t1 := \langle t2 \to t3 \rangle\hat{\ }\gamma',\ t2 := \texttt{int},\ t3 := \texttt{int},\ t4 := \texttt{int},$$
$$\gamma' := d0,\ \gamma1 := d0,\ \gamma2 := d1,\ \gamma3 := d0\}$$

EC の変数の除去を行う

$\gamma 1$ **を選ぶ** C **から** $\gamma' \geq \gamma 1$ **を消去し** Θ **に代入** $\gamma 1 := d0$ **を追加**

$\gamma 2$ **を選ぶ** C **から** $\gamma 2 \geq d1$ **を消去し** Θ **に代入** $\gamma 2 := d1$ **を追加**

$\gamma 3$ **を選ぶ** C **から** $\gamma 2 \geq \gamma 3$ **を消去し** Θ **に代入** $\gamma 3 := d0$ **を追加**

制約解消：ECの不等式制約の解消の例

$$\underline{\lambda} x.(\underline{\textbf{int}}\ 1\ \underline{+}\ x) : \quad \langle \texttt{int} \to \texttt{int} \rangle \hat{\ } d0$$

$$C = \{ \qquad \}$$

$$\Theta = \{t1 := \langle t2 \to t3 \rangle \hat{\ } \gamma',\ t2 := \texttt{int},\ t3 := \texttt{int},\ t4 := \texttt{int},$$
$$\gamma' := d0,\ \gamma 1 := d0,\ \gamma 2 := d1,\ \gamma 3 := d0\}$$

ECの変数の除去を行う

$\gamma 1$ **を選ぶ** C **から** $\gamma' \geq \gamma 1$ **を消去し** Θ **に代入** $\gamma 1 := d0$ **を追加**

$\gamma 2$ **を選ぶ** C **から** $\gamma 2 \geq d1$ **を消去し** Θ **に代入** $\gamma 2 := d1$ **を追加**

$\gamma 3$ **を選ぶ** C **から** $\gamma 2 \geq \gamma 3$ **を消去し** Θ **に代入** $\gamma 3 := d0$ **を追加**

研究成果

コード生成 + shift0/reset0 の体系に対する

- 型システムの設計
- 型推論アルゴリズムの開発

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