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

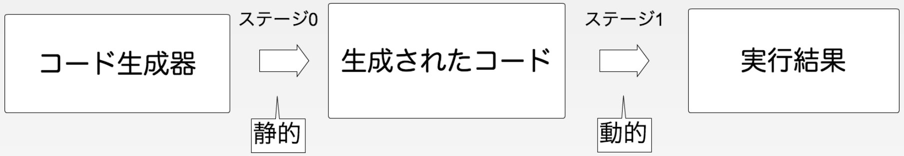
2017/1/27

筑波大学修論審査会

アウトライン

アウトライン

目的

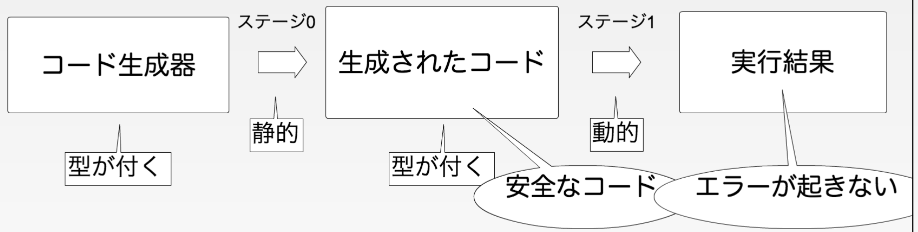


- **コード生成をサポートするプログラム言語**
  (=**コード生成言語**)

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

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

let 挿入 (コード移動) の実現方法

コード生成器

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

生成したいコード

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

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

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

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

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)

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

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

$$\vdash e : \langle t \rangle\hat{}\gamma 0;\ \epsilon$$

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

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

型付けの例 (2)

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

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

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

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

$$\frac{\Gamma \vdash x : \texttt{int}; \sigma \quad \Gamma \vdash y : \texttt{int}; \sigma}{\Gamma \vdash x + y : t; \sigma}\ Constr;\ t = \texttt{int}$$

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

- 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	$\gamma 0 = \gamma 1$	$\gamma 0 \geq \gamma 1 \gamma 0 \geq \gamma 1$
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

$$\lambda x.(\textbf{int}\ 1 + x) : t1\langle \texttt{int} \to \texttt{int} \rangle \hat{}\, d0$$

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

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

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

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