コード生成言語に限定継続 shift0/reset0 を加えた型システムの設計

大石純平

筑波大学 大学院
プログラム論理研究室

2016/7/12

アウトライン

アウトライン

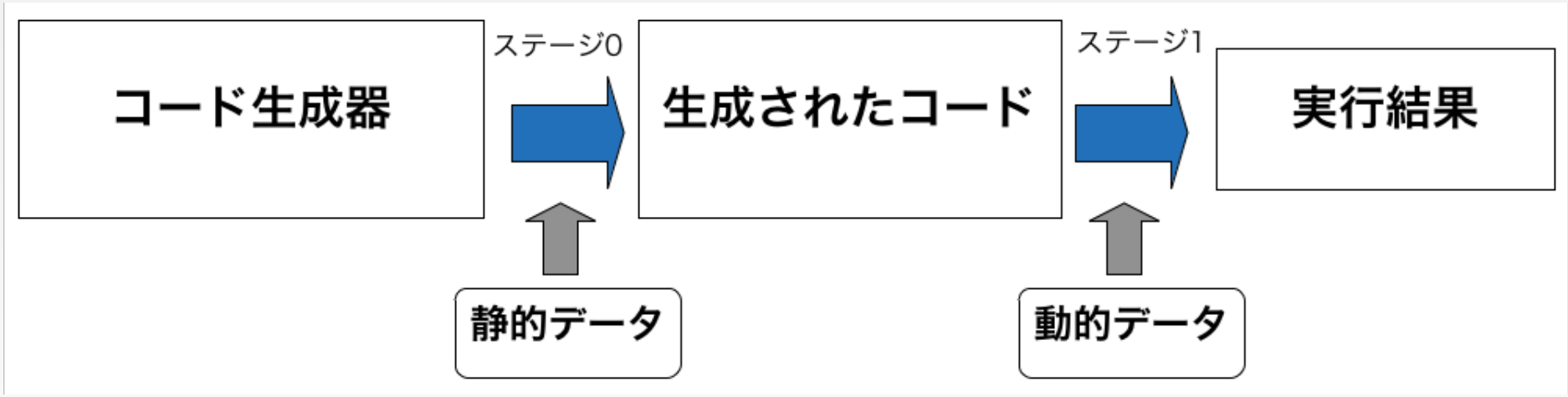
概要

- Sudo らが作ったコード体系の型システムでは，破壊的代入という副作用を扱うようなコード生成の安全性を保証した.
- しかし，多段階の let 挿入を扱うようなコード生成の安全性は保証していなかった

⇒ 多段階の let 挿入を安全に扱うために型システムを改良した.

アウトライン

段階的計算 (Staged Computation)



- コード生成ステージとコード実行ステージ
- 「保守性・再利用性の高さ」と「実行性能の高さ」の両立

⇒ 段階的計算をサポートするプログラム言語

コード生成における課題

生成されたコードの信頼性 (正しさ)

- 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

コード生成における課題

生成されたコードの信頼性 (正しさ)

- 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

従来研究

- コード生成プログラムが，安全なコードのみを生成する事を保証
- 安全なコード: 構文，型，変数束縛が正しいプログラム
- let 挿入等を実現する計算エフェクトを含む場合の安全性保証は研究途上

コントロールオペレータ

プログラミング言語におけるプログラムを制御するプリミティブ

- exception (**例外**): C++, Java, ML
- call/cc (**第一級継続**): Scheme, SML/NJ
- shift/reset (**限定継続**): Racket, Scala, OCaml
  - 1989 **年以降多数研究がある**
  - **コード生成における** let **挿入が実現可能**
- shift0/reset0
  - 2011 **年以降研究が活発化.**
  - **コード生成における多段階** let **挿入が可能**

多段階 let 挿入

多段階 let 挿入

$$
\begin{aligned}
e_2 = \ & \underline{\textbf{reset0}}\ \ \underline{\textbf{clet}}\ x_1 = \%3\ \underline{\textbf{in}} \\
& \underline{\textbf{reset0}}\ \ \underline{\textbf{clet}}\ x_2 = \%5\ \underline{\textbf{in}} \\
& \underline{\textbf{shift0}}\ k_2\ \rightarrow\ \underline{\textbf{shift0}}\ k_1\ \rightarrow\ \underline{\textbf{clet}}\ y = t\ \underline{\textbf{in}} \\
& \underline{\textbf{throw}}\ k_1\ (\underline{\textbf{throw}}\ k_2\ (x_1\ \underline{+}\ x_2\ \underline{+}\ y))
\end{aligned}
$$

多段階 let 挿入

多段階 let 挿入

$$
\begin{aligned}
e_2 \rightsquigarrow^* & \ \textbf{clet}\ y = t\ \textbf{in} \\
& \quad \textbf{reset0}\ \ \textbf{clet}\ x_2 = \%5\ \textbf{in} \\
& \quad \textbf{reset0}\ \ \textbf{clet}\ x_1 = \%3\ \textbf{in} \\
& \quad (x_1 \mathbin{\underline{+}} x_2 \mathbin{\underline{+}} y)
\end{aligned}
$$

安全性の静的保証

安全性の静的保証

動的に生成されたコードのデバッグは困難
⇒ コード生成の前に安全性を保証したい

アウトライン

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

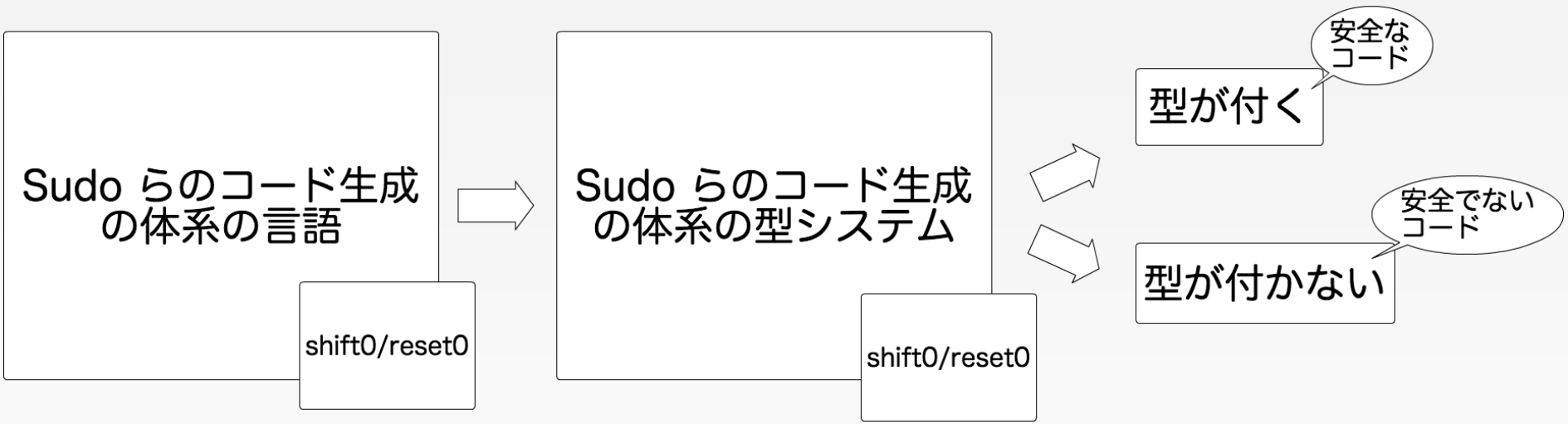
行うこと

- **コントロールオペレータ** shift0/reset0 **を利用し，深く入れ子になった内側の** shift0 **からの** let **挿入 (多段階** let **挿入) などのコード生成技法を行える言語の設計**
- shift0/reset0 **を持つコード生成言語の型システムの設計**

困難・問題点

- shift0/reset0 は shift/reset より強力であるため，型システムが非常に複雑
- コード生成言語の型システムも一定の複雑さを持つ
- ⇒ 単純な融合は困難

本研究の手法


Sudo らのコード生成
の体系の言語
shift0/reset0
Sudo らのコード生成
の体系の型システム
shift0/reset0
型が付く
安全な
コード
型が付かない
安全でない
コード

変数スコープの利用

一般的な shift0/reset0 (throw) **の式の形**

$$(\underline{\textbf{reset0}}\ \ldots\ (\underline{\textbf{shift0}}\ k \rightarrow\ \ \ldots\ (\underline{\textbf{throw}}\ k\ \ldots\ )))$$

変数スコープの利用

- γ は変数のスコープを表す.
- その時点で使える自由変数の集合と思ってもらえば良い.
- γ には，包含関係があり，それを $\gamma_0 \geq \gamma_1$ というような順序で表している.
- 直感的には γ_0 より γ_1 のほうが使える自由変数が多いという意味である.

$$(\underline{\textbf{reset0}}\ \gamma_0\ (\underline{\textbf{shift0}}\ k \rightarrow\ \ \gamma_1\ (\underline{\textbf{throw}}\ k\ \gamma_3)))$$

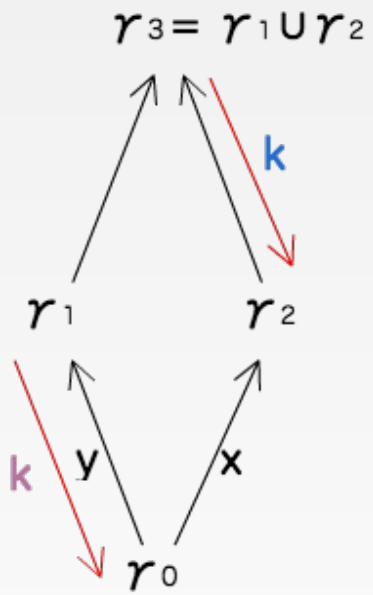
shift0/reset0 による let 挿入が型安全性を保つ条件

一般的な shift0/reset0 (throw) **の式の形**

$$(\underline{\textbf{reset0}}\ \ldots\ (\underline{\textbf{shift0}}\ k \to\ \ \ldots\ (\underline{\textbf{throw}}\ k\ \ldots\ )))$$

shift0/reset0 による let 挿入が型安全性を保つ条件

(**reset0** **clet** $y = e_1$ **in** ...
(**shift0** $k \rightarrow$ **clet** $x =$ ... **in** ...
(**throw** k ...)))
=>
(**reset0** **clet** $y = e_1$ **in** γ_0
(**shift0** $k \rightarrow$ **clet** $x = \gamma_1$ **in** γ_2
(**throw** k γ_3)))



$k \ : \ (\langle\cdot\rangle^{\gamma_0} \Rightarrow \langle\cdot\rangle^{\gamma_1})$
$k \ : \ (\langle\cdot\rangle^{\gamma_3} \Rightarrow \langle\cdot\rangle^{\gamma_2})$

型が付く例/付かない例

$$
\begin{aligned}
e_1 = \ & \underline{\textsf{reset0}}\ \ \underline{\textsf{clet}}\ x_1 = \%3\ \underline{\textsf{in}} \\
& \underline{\textsf{reset0}}\ \ \underline{\textsf{clet}}\ x_2 = \%5\ \underline{\textsf{in}} \\
& \underline{\textsf{shift0}}\ k\ \rightarrow\ \underline{\textsf{clet}}\ y = t\ \underline{\textsf{in}} \\
& \underline{\textsf{throw}}\ k\ (x_1\ \underline{+}\ x_2\ \underline{+}\ y)
\end{aligned}
$$

型が付く例/付かない例

$$
\begin{aligned}
e_1 = \ & \underline{\textsf{reset0}}\ \ \underline{\textsf{clet}}\ x_1 = \%3\ \underline{\textsf{in}} \\
& \underline{\textsf{reset0}}\ \ \underline{\textsf{clet}}\ x_2 = \%5\ \underline{\textsf{in}} \\
& \underline{\textsf{shift0}}\ k\ \to\ \underline{\textsf{clet}}\ y = t\ \underline{\textsf{in}} \\
& \underline{\textsf{throw}}\ k\ (x_1\ \underline{+}\ x_2\ \underline{+}\ y)
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
e_1 \rightsquigarrow^* \ & \underline{\textsf{reset0}}\ \ \underline{\textsf{clet}}\ x_1 = \%3\ \underline{\textsf{in}} \\
& \underline{\textsf{clet}}\ y = t\ \underline{\textsf{in}} \\
& \underline{\textsf{reset0}}\ \ \underline{\textsf{clet}}\ x_2 = \%5\ \underline{\textsf{in}} \\
& (x_1\ \underline{+}\ x_2\ \underline{+}\ y)
\end{aligned}
$$

型が付く例/付かない例

$$
\begin{aligned}
e_1 = \ & \underline{\textsf{reset0}}\ \ \underline{\textsf{clet}}\ x_1 = \%3\ \underline{\textsf{in}} \\
& \underline{\textsf{reset0}}\ \ \underline{\textsf{clet}}\ x_2 = \%5\ \underline{\textsf{in}} \\
& \underline{\textsf{shift0}}\ k\ \rightarrow\ \underline{\textsf{clet}}\ y = t\ \underline{\textsf{in}} \\
& \underline{\textsf{throw}}\ k\ (x_1\ \underline{+}\ x_2\ \underline{+}\ y)
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
e_1 \rightsquigarrow^* \ & \underline{\textsf{reset0}}\ \ \underline{\textsf{clet}}\ x_1 = \%3\ \underline{\textsf{in}} \\
& \underline{\textsf{clet}}\ y = t\ \underline{\textsf{in}} \\
& \underline{\textsf{reset0}}\ \ \underline{\textsf{clet}}\ x_2 = \%5\ \underline{\textsf{in}} \\
& (x_1\ \underline{+}\ x_2\ \underline{+}\ y)
\end{aligned}
$$

$t = \%7$ か $t = x_1$ のとき e_1 は型が付く
$t = x_2$ のとき e_1 は型が付かない

型が付く例/付かない例

$$
\begin{aligned}
e_2 = \ & \underline{\textsf{reset0}}\ \ \underline{\textsf{clet}}\ x_1 = \%3\ \underline{\textsf{in}} \\
& \underline{\textsf{reset0}}\ \ \underline{\textsf{clet}}\ x_2 = \%5\ \underline{\textsf{in}} \\
& \underline{\textsf{shift0}}\ k_2\ \rightarrow\ \underline{\textsf{shift0}}\ k_1\ \rightarrow\ \underline{\textsf{clet}}\ y = t\ \underline{\textsf{in}} \\
& \underline{\textsf{throw}}\ k_1\ (\underline{\textsf{throw}}\ k_2\ (x_1\ \underline{+}\ x_2\ \underline{+}\ y))
\end{aligned}
$$

型が付く例/付かない例

$$
\begin{aligned}
e_2 = \ & \underline{\textsf{reset0}}\ \ \underline{\textsf{clet}}\ x_1 = \%3\ \underline{\textsf{in}} \\
& \underline{\textsf{reset0}}\ \ \underline{\textsf{clet}}\ x_2 = \%5\ \underline{\textsf{in}} \\
& \underline{\textsf{shift0}}\ k_2\ \rightarrow\ \underline{\textsf{shift0}}\ k_1\ \rightarrow\ \underline{\textsf{clet}}\ y = t\ \underline{\textsf{in}} \\
& \underline{\textsf{throw}}\ k_1\ (\underline{\textsf{throw}}\ k_2\ (x_1\ \underline{+}\ x_2\ \underline{+}\ y))
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
e_2 \rightsquigarrow^* \ & \underline{\textsf{clet}}\ y = t\ \underline{\textsf{in}} \\
& \underline{\textsf{reset0}}\ \ \underline{\textsf{clet}}\ x_2 = \%5\ \underline{\textsf{in}} \\
& \underline{\textsf{reset0}}\ \ \underline{\textsf{clet}}\ x_1 = \%3\ \underline{\textsf{in}} \\
& (x_1\ \underline{+}\ x_2\ \underline{+}\ y)
\end{aligned}
$$

型が付く例/付かない例

$$
\begin{aligned}
e_2 = \ & \underline{\textsf{reset0}}\ \ \underline{\textsf{clet}}\ x_1 = \%3\ \underline{\textsf{in}} \\
& \underline{\textsf{reset0}}\ \ \underline{\textsf{clet}}\ x_2 = \%5\ \underline{\textsf{in}} \\
& \underline{\textsf{shift0}}\ k_2\ \to\ \underline{\textsf{shift0}}\ k_1\ \to\ \underline{\textsf{clet}}\ y = t\ \underline{\textsf{in}} \\
& \underline{\textsf{throw}}\ k_1\ (\underline{\textsf{throw}}\ k_2\ (x_1\ \underline{+}\ x_2\ \underline{+}\ y))
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
e_2 \rightsquigarrow^* \ & \underline{\textsf{clet}}\ y = t\ \underline{\textsf{in}} \\
& \underline{\textsf{reset0}}\ \ \underline{\textsf{clet}}\ x_2 = \%5\ \underline{\textsf{in}} \\
& \underline{\textsf{reset0}}\ \ \underline{\textsf{clet}}\ x_1 = \%3\ \underline{\textsf{in}} \\
& (x_1\ \underline{+}\ x_2\ \underline{+}\ y)
\end{aligned}
$$

$t = \%7$ **のとき** e_2 **は型が付く**

$t = x_2$ **か** $t = x_1$ **のとき** e_2 **は型が付かない**

アウトライン

まとめと今後

- コードの型システムに shift0 reset0 を組み込んだ 型システムの設計を行った
- その型システムによって型が付く場合と付かない場合の例をみた.
- 今後 answer type modification に対応した型システムを設計し，(subject reduction 等の) 健全性の証明を行う