メタ計算を用いた Continuation based C の検証手法

比嘉 健太 並列信頼研

プログラミング言語と信頼性

・信頼性の高いソフトウェアを提供することは重要である
・ソフトウェアが要求される仕様を満たすかどうか検証する
・モデル検査的アプローチと定理証明的アプローチの2つがある
  - モデル検査的アプローチ: プログラムの状態を数え上げ
    仕様に背く状態が無いか確認する
  - 定理証明的アプローチ: プログラムの正しさを直接証明する
・検証しやすい言語 Continuation based C (CbC)を開発している
・CbC では両アプローチによる検証が可能なことを示す

Continuation based C (CbC)

・アセンブラとC言語の中間のような言語で、構文はほとんど C 言語
・OS や組み込みソフトウェアなどが対象
・CodeSegment と DataSegment という単位でプログラミング
・CodeSegment を接続することでプログラムを構成する
・メタ計算の切り替えにより検証や並列実行、例外処理を行なう

```
__code cs0(int a, int b) {
  goto cs1(a+b);
}
__code cs1(int c) {
  goto cs2(c);
}
```

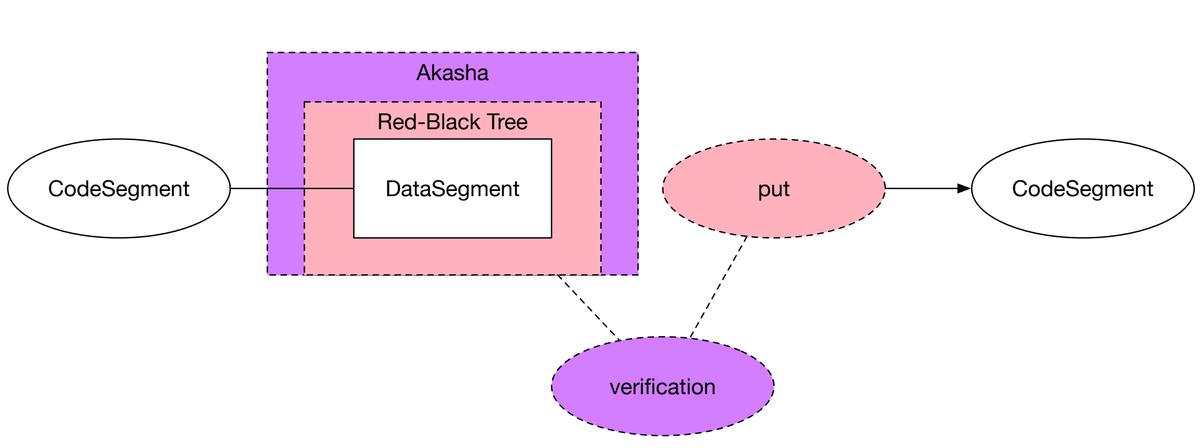
・CbC のプログラム例
・cs0 と cs1 が CodeSegment
・a と b の数値を加算する cs0
・引数部分が DataSegment
・goto が CodeSegment の接続

CbC とメタ計算

・メタ計算とはとある計算を支える計算
・ネットワーク処理、例外処理、並列実行など
・CbC は通常レベルの計算とメタ計算を分離して考える
  - 通常レベルではポインタは出てこない、など
・ CodeSegment の接続部分に処理を追加することで拡張する
  - メタ計算をする CodeSegment は Meta CodeSegment
  - メタ計算に必要な DataSegment は Meta DataSegment

メタ計算ライブラリ akasha

・CbC に対するモデル検査的アプローチ
・CbC で記述されたコードを CbC 自身で検証可能
  - spin などのモデル検査器は検証コードと実行コードが異なる
・具体的には CodeSegment の接続部分をメタ計算として定義
・網羅的に実行するよう接続部分を上書きすることで状態を列挙



・非破壊赤黒木の有限回の挿入操作に関する仕様を検証
・要素数13までは木がバランスすることを保証
・恣意的にバグを仕込むと仕様に背く状態を返却
・CBMC ではバグに由来した反例を検出できず

```
if (context->data[AkashaInfo]->akashaInfo.maxHeight >
    2*context->data[AkashaInfo]->akashaInfo.minHeight)
```

定理証明とプログラム

・Curry-Howard Isomorphism により証明とプログラムの型は対応
・論理式は型に相当し、証明はその型を持つ値の導出
・Coq、Agda といった強力な型を持つ言語では証明が記述可能
・三段論法の自然演繹による証明木は以下のようになる
  - 三段論法: ((A ならば B) かつ (B ならば C)) ならば (A ならば C)

$$\dfrac{\dfrac{[A]_{(1)} \quad \dfrac{[(A \Rightarrow B) \wedge (B \Rightarrow C)]_{(2)}}{(A \Rightarrow B)} \wedge 1\mathcal{E}}{B} \Rightarrow \mathcal{E} \qquad \dfrac{[(A \Rightarrow B) \wedge (B \Rightarrow C)]_{(2)}}{(B \Rightarrow C)} \wedge 2\mathcal{E}}{\dfrac{C}{A \Rightarrow C} \Rightarrow \mathcal{I}_{(1)}} \Rightarrow \mathcal{E}$$
$$\dfrac{}{((A \Rightarrow B) \wedge (B \Rightarrow C)) \Rightarrow (A \Rightarrow C)} \Rightarrow \mathcal{I}_{(2)}$$

・三段論法の Agda による証明は以下のようになる

```
f : {A B C : Set} -> ((A -> B) × (B -> C)) -> (A -> C)
f = \p x -> (snd p) ((fst p) x)
```

Agda と Continuation based C

・CbC で CbC 自身を証明したいが現状ではできない
・証明支援系 Agda 上で CbC を記述することで形式的な定義を得る
・DataSegemnt はレコード型となり、CodeSegment は関数型となる

```
record ds0 : Set where
  field
    a : Int
    b : Int

cs0 : CodeSegment ds0 ds1
cs0 = cs (\d -> goto cs1 (record {c = (ds0.a d) + (ds0.b d)}))
```

・メタ計算は部分型を利用することで定義可能
・CbC を Agda 上で記述することで証明が可能になった

```
comp-associative : (a : CodeSegment A B) (b : CodeSegment C D)
  (c : CodeSegment E F) -> csComp  c (csComp b a) ≡ csComp  (csComp c b) a
-- c . (b . a) ≡ (c . b) . a
```

・どの値も全く同じ項に簡約されることを示すことで等式の証明となる
・操作が任意の回数行わなれるような検証も可能
・SingleLinkedStack に対する操作の性質を証明した
・「あるスタックに対してn回だけ値を積んだ後、
  同じ回数だけ値を取り出すと元のスタックに等しい」

```
n-push-pop-type n cn ce st = M.exec (M.csComp (n-pop  n) (n-push n)) m ≡ m
-- goto (pop*n . push*n) mds ≡ mds
```

まとめと今後の課題

・Continuation based C に対する検証アプローチを2つ提案
・モデル検査的アプローチ
  - 非破壊赤黒木のプログラムを検証用に変更することなく検証
  - 限定された回数分の操作に対して仕様を保証
  - C/C++ の有界モデル検査器 CBMC より広い範囲を検証できた
・定理証明的アプローチ
  - 証明支援系 Agda 上に CodeSegment と DataSegment を定義
  - 基本型、関数型、レコード型、部分型によって型付け可能
  - CbC で実装されたスタックを Agda に変換して性質を証明
  - 任意の回数分の操作に対して性質を保証
・今後の課題
  - 依存型を CbC に導入して CbC で自身を証明可能にする
  - 非破壊赤黒木の証明を記述する
  - CbC の形式的な定義や型システムの解析