実用的な暗号の形式的証明に向けて:
アセンブリでの多倍長整数アルゴリズムの形式的検証

アフェルト レナルド　　ソフトウェアセキュリティ研究チーム

セキュリティのための最も厳密な検証手法

形式的検証とは? → 国際規格(コモンクライテリアなど)による最も厳密なセキュリティレベル:

1. ソフトウェアの実装の正しさの機械検証
2. 第三者による全自動検査可能な証明の発行

暗号とは? → セキュリティプロトコルの基本的な部分:

- 数論による情報処理
- 高い効率を要求

→

- 先端アルゴリズム
- 低レベル実装

代表的な暗号:RSAやElGamalなど

証明理論に基づくコンピュータ上での検証

定理証明器とは？証明理論に基づく開発環境:

- 型理論に基づくプログラミング
- 一階述語論理などによる自動検証
- 高階述語論理(帰納法など)による推論

} 機械検証

- 型付き高階ラムダ計算の証明オブジェクト } 第三者による全自動検査可

代表的な定理証明器:Coq (http://www.lix.polytechnique.fr/coq/)

我々の貢献

アセンブリでの整数論アルゴリズムの検証ライブラリ:

- Smartcard向けのアセンブリ (SmartMIPS, MIPS Technologies)
- 低レベルデータ構造の扱い
  - 文字型やポインターや多倍長整数など
- ホーア論理による証明の構成
  - その論理自体の健全性の機械検証など
  - 分離論理による形式的証明の組み合わせ:

{事前条件$_1$}プログラム$_1${中間条件}

free(事前条件$_2$)∩ modified(プログラム$_1$)=∅

{事前条件$_1$*事前条件$_2$} プログラム$_1$ {中間条件*事前条件$_2$}

{中間条件*事前条件$_2$} プログラム$_2$ {事後条件}

{事前条件$_1$*事前条件$_2$} プログラム$_1$;プログラム$_2$ {事後条件}

- 実用的な暗号関数の実装とその形式的証明 ----------→
- 形式的検証済みの翻訳など

参考文献

- R. Affeldt, D. Nowak, and K. Yamada, *Certifying Assembly with Formal Cryptographic Proofs: the Case of BBS*, 投稿中
- R. Affeldt, *A Library for Formal Verification of Low-level Programs*, http://staff.aist.go.jp/reynald.affeldt/coqdev/
- アフェルト　レナルド,「Coq上での組み込み用途の冪剰余の検証」, PPL2009
- R. Affeldt and N. Marti, *An Approach to Formal Verification of Arithmetic Functions in Assembly*, ASIAN 2006
- J.C. Reynolds, *Separation Logic: A Logic for Shared Mutable Data Structures*, LICS 2002

応用例:
効率的なアセンブリでの冪剰余の形式的検証

プログラムの規模:

アセンブリ関数	命令数*
Montgomery冪剰余	100
冪乗ループ	13
Montgomery掛算	87
Montgomery 掛算(元)	36
多倍長引算	20
その他(多倍長比較, 初期化)	17

*nopでない命令 , 繰り返し呼び出しのインラインなし

形式的証明の組み合わせによる形式的検証:

Montgomery掛算(元)

$\{X,A' < M \ \wedge \ M_0 \times \alpha \equiv -1\ [\beta]\}$

…

$\{\exists X', \beta^k X' \equiv X \times A'\ [M] \wedge \underline{X' < 2 \times M}\}$

Montgomery掛算

$\{X,A' < M \ \wedge \ M_0 \times \alpha \equiv -1\ [\beta]\}$

```
multizero x';
mflhxu gpr_zero ;
mthi gpr_zero ;
mtlo gpr_zero ;
montgomery_raw k x a' x' m ;
ifte_beq C, gpr_zero thendo
  multi_lt k x' m ;
  ifte_beq ret, gpr_zero thendo
    multisub k x' m x'
elsedo
  addiu t t 4_16 ;
  sw C 0_16 t ;
  addiu Sk k 1_16 ;
  multisub Sk x' m x'
```

$\{\exists X', \beta^k X' \equiv X \times A'\ [M] \wedge \underline{X' < M}\}$

Montgomery冪剰余

$\{A \equiv \beta^k\ [M] \wedge A' \equiv \beta^{2k}\ [M] \wedge X,A,A' < M \wedge$
$\text{odd } M \ \wedge \ |e| < 32 \ \wedge \ M_0 \times \alpha \equiv -1\ [\beta]\}$

```
montgomery k x a' x' m ;
addiu i l 0_16 ;
while (bgez i) (
  montgomery k a a a' m ;
  srlv ei e i ;
  andi ei ei 1_16 ;
  ifte_beq ei, gpr_zero thendo
    (xor a a a' ;
     xor a' a a' ;
     xor a a a')
  elsedo
    montgomery k a' x' a m ;
  addiu i i -1_16) ;
montgomery k a one' a' m
```

$\{\exists A', A' \equiv X^e\ [M] \ \wedge \ A' < M\}$

実験結果の一覧

多倍長関数	仕様(略術)	形式的証明行数	
		合計	事前・事後条件だけ
多倍長足算	$C := A + B,\ B := A + B$	240	77
多倍長引算	$C := A - B,\ B := A - B,\ A := A - B$	472	166
多倍長掛算	$C := A \times B$	570	213
Montgomery掛算(元)	$Z := X \times Y\ [M],\ Z := X^2\ [M]\ (Z < 2M)$	1239	468
初期化	$A := 0$	137	25
多倍長比較	$A < B$	422	96
Montgomery掛算	$Z := X \times Y\ [M],\ Z := X^2\ [M]\ (Z < M)$	474	183
Montgomery冪剰余	$Z := X^e\ [M]$	616	233
BBS疑似乱数生成器	$Z := X^2\ [M]\ \&\ 1 \ \|\|\ X^4\ [M]\ \&\ 1 \ \|\| \ldots$	843	298

形式的検証済みのSmartMIPSでの多倍長関数

今後の課題

- 大規模のプログラムの形式的検証に向けて拡張
- 高レベルプログラミング言語との形式的なインターフェイス
- PKCS#1に対するRSAの実装の形式的検証

メール先:reynald.affeldt@aist.go.jp; 平成21年5月12日

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
AIST

Research Center for Information Security

実用的な暗号の形式的証明に向けて: アセンブリでの多倍長整数アルゴリズムの形式的検証

アフェルト レナルド

情報セキュリティ研究センター (RCIS)
ソフトウェアセキュリティ研究チーム

実用的な暗号の実装の形式的証明

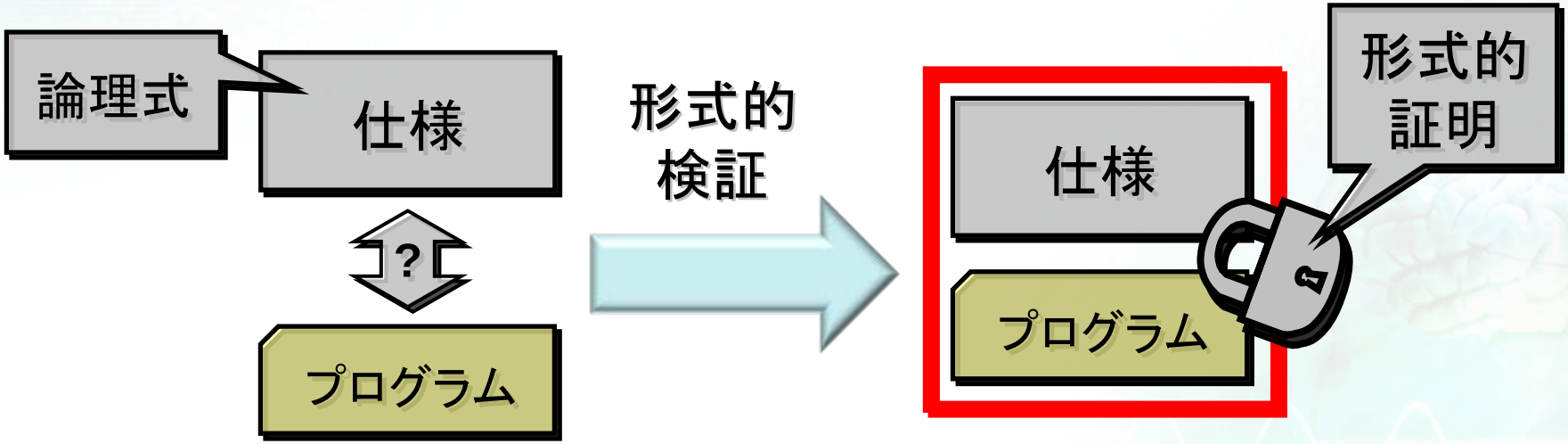
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology AIST

Research Center for Information Security

- 最終目的: 高信頼な安全性の証明
  - 暗号はセキュリティプロトコルの基本的な部分
    ⇒ 暗号の実装の誤りで安全性が破れる
- しかし, 実用的な暗号の実装の検証は困難
  - 整数論による情報処理, 高い効率を要求
    ⇒ 先端アルゴリズム, 低レベル実装
    特に, 組込みシステム(Smartcardなど)

形式的検証とは?

- 国際規格(コモンクライテリアなど)における最も厳密なセキュリティレベル:
  1. ソフトウェアの実装の正しさの機械検証
  2. 第三者による全自動検査可能な証明の発行



National Institute of Advanced Industrial Science and Technology AIST

Research Center for Information Security

我々の貢献

- アセンブリ言語での整数論アルゴリズムの形式的検証を提供する
  - Coq定理証明器の上でのライブラリの開発
    - 低レベルデータ構造の扱いや
    - ホーア論理による証明の構成などの形式化
  - 実用的な暗号関数の実装とその形式的証明
    - 例: 多倍長足し算など, Montgomery掛算, 疑似乱数生成器
    - 本ポスターではMontgomery冪剰余を細かく取り上げる
  - インターネット上で公開: http://staff.aist.go.jp/reynald.affeldt/coqdev/