FCS-ARSPA-WITS, CSF, FCC' 08 参加報告

— 安全性の形式化について —

川本 裕輔 † アフェルト レナルド ‡

† 東京大学大学院情報理工学系研究科

‡ 産業技術総合研究所情報セキュリティ研究センター

概要

6 月に開かれた国際会議 / ワークショップ

- FCS-ARSPA-WITS'08 15 件 (+ 招待講演 2 件)

  Joint Workshop on Foundations of Computer Security,
  Automated Reasoning for Security Protocol Analysis
  and Issues in the Theory of Security

- CSF'08 23 件 (+ 招待講演 1 件)

  IEEE Computer Security Foundations Symposium

- FCC'08 8 件 (+ 招待講演 1 件)

  Workshop on Formal and Computational Cryptography

の中からいくつかの研究を紹介する

目次

- 汎用的結合可能性 (UC) の改良

  R. Küsters and M. Tuengerthal,

  “Joint State Theorems for Public-Key Encryption & Digital Signature Functionalities with Local Computation”

- 記号モデルの計算論的健全性

  M. Backes and D. Unruh,

  “Computational Soundness of Symbolic Zero-knowledge Proofs Against Active Attackers”

- FCCの話題

目次

- 汎用的結合可能性 (UC) の改良

  R. Küsters and M. Tuengerthal,

  “Joint State Theorems for Public-Key Encryption & Digital Signature Functionalities with Local Computation”

- 記号モデルの計算論的健全性

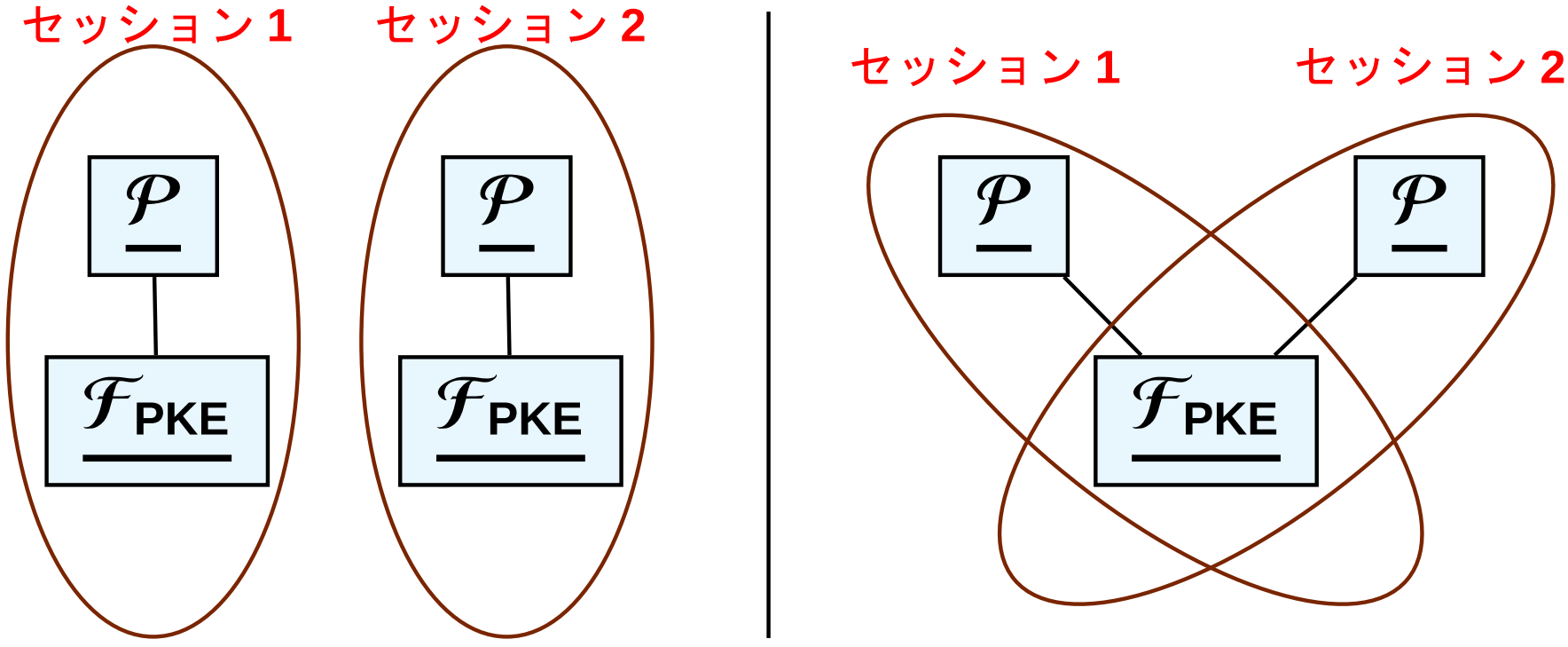
  M. Backes and D. Unruh,

  “Computational Soundness of Symbolic Zero-knowledge Proofs Against Active Attackers”

- FCCの話題

[Küsters-Tuengerthal'08] の概要

- ジョイント状態 (Joint State) 定理の必要性
  - 通常の UC では，異なるセッションの間で，
    鍵や乱数を共有できない.



[Küsters-Tuengerthal'08] の概要

- ジョイント状態 (Joint State) 定理の必要性
  - 通常の UC では，異なるセッションの間で，鍵や乱数を共有できない.
- UC におけるジョイント状態定理の問題点.
- UC を改良し，ジョイント状態定理を得る.
- 電子署名，IND-CCA / IND-RCCA 公開鍵暗号の理想機能を定式化.

IITM (Inexhaustive ITM)

- UC と [Küsters-Tuengerthal'08] の比較

	UC	[Küsters-Tuengerthal'08]
ジョイント状態定理	問題あり	容易に得られる
対話的チューリング機械 (ITM)	exhaustive	inexhaustive

IITM (Inexhaustive ITM)

- UC と [Küsters-Tuengerthal'08] の比較

	UC	[Küsters-Tuengerthal'08]
ジョイント状態定理	問題あり	容易に得られる
対話的チューリング機械 (ITM)	exhaustive	inexhaustive

- (exhaustive) ITM の問題点
  - ITM は, 総入力長と $\cdots$ に関して多項式時間で動作.
    $\longrightarrow$ 入力は, 遮断される不要メッセージを含む.
  - 「複数の ITM からなるシステム」を「一つの ITM」で模倣 (simulate) できないことがある.

安全性の定式化

- strong simulatability

  プロトコル と 実現したい理想機能 の 識別不能性

  プロトコル$\mathcal{P}$ が 理想機能$\mathcal{F}$ を実現する ($\mathcal{P} \leq^{SS} \mathcal{F}$)

  $\overset{\text{def}}{\Leftrightarrow}$ $\exists \mathcal{S}$: Simulator $\forall \mathcal{E}$: Environment $\mathcal{E} \| \mathcal{P} \equiv \mathcal{E} \| \mathcal{S} \| \mathcal{F}$

  - black-box simulatability と等価.
  - $\mathcal{F}$ がある条件を満たすとき, universal simulatability (UC) と等価.

結合可能性定理

- 結合可能性定理 (Composition Theorem)

1. $\mathcal{P}_1 \leq^{\mathrm{SS}} \mathcal{F}_1$, $\mathcal{P}_2 \leq^{\mathrm{SS}} \mathcal{F}_2$ ならば $\mathcal{P}_1 \| \mathcal{P}_2 \leq^{\mathrm{SS}} \mathcal{F}_1 \| \mathcal{F}_2$
2. $\mathcal{P} \leq^{\mathrm{SS}} \mathcal{F}$ ならば $Q \| !\underline{\mathcal{P}} \leq^{\mathrm{SS}} Q \| !\underline{\mathcal{F}}$

ジョイント状態定理

- ジョイント状態定理 (Joint State Theorem)

  - $\widehat{\mathcal{P}} \leq^{\mathrm{SS}} !\mathcal{F}$ ならば $\mathcal{Q} \| \widehat{\mathcal{P}} \leq^{\mathrm{SS}} \mathcal{Q} \| !\mathcal{F}$

（このような $\widehat{\mathcal{P}}$ を見つけることはあまり簡単ではない.）

ジョイント状態定理

- ジョイント状態定理 (Joint State Theorem)

  - $\widehat{\mathcal{P}} \leq^{SS} !\mathcal{F}$ ならば $\mathcal{Q} \| \widehat{\mathcal{P}} \leq^{SS} \mathcal{Q} \| !\mathcal{F}$

※ UCの場合 [Canetti-Rabin03] $!\mathcal{F}$ を記述できない

$\mathcal{Q}$ ：理想機能 $\mathcal{F}$ の複数のインスタンスを用いるプロトコル

$\widehat{\mathcal{F}}$ ： $!\mathcal{F}$ を模倣する ITM

- $\widehat{\mathcal{P}} \leq \widehat{\mathcal{F}}$ ならば $\mathcal{Q}^{[\widehat{\mathcal{P}}]} \leq \mathcal{Q}$

ジョイント状態定理

- ジョイント状態定理 (Joint State Theorem)

  - $\widehat{\mathcal{P}} \leq^{SS} !\mathcal{F}$ ならば $\mathcal{Q} \| \widehat{\mathcal{P}} \leq^{SS} \mathcal{Q} \| !\mathcal{F}$

※ UCの場合 [Canetti-Rabin03] $!\mathcal{F}$ を記述できない

$\mathcal{Q}$ ：理想機能 $\mathcal{F}$ の複数のインスタンスを用いるプロトコル

$\widehat{\mathcal{F}}$ ： $!\mathcal{F}$ を模倣するITM $\widehat{\mathcal{F}}$ をとれない可能性あり

- $\widehat{\mathcal{P}} \leq \widehat{\mathcal{F}}$ ならば $\mathcal{Q}^{[\widehat{\mathcal{P}}]} \leq \mathcal{Q}$ $\mathcal{Q}^{[\widehat{\mathcal{P}}]}$ の定義を明記せず

IITM (Inexhaustive ITM)

- UC と [Küsters-Tuengerthal'08] の比較

	UC	[Küsters-Tuengerthal'08]
ジョイント状態定理	問題あり	容易に得られる
対話的チューリング機械 (ITM)	exhaustive	inexhaustive
入力に関する多項式時間制約	不要メッセージ含む	不要メッセージ以外
システムを一つの ITM で	模倣できないかも	模倣できる

目次

- 汎用的結合可能性 (UC) の改良

  R. Küsters and M. Tuengerthal,
  “Joint State Theorems for Public-Key Encryption &
  Digital Signature Functionalities with Local Computation”

- 記号モデルの計算論的健全性

  M. Backes and D. Unruh,
  “Computational Soundness of Symbolic Zero-knowledge
  Proofs Against Active Attackers”

- FCCの話題

計算論的健全性とは

記号的手法 $\Longrightarrow$ 計算論的手法

(フォーマルメソッド)

計算論的健全性

計算論的健全性とは

記号的手法 $\Longrightarrow$ 計算論的手法

(フォーマルメソッド)

計算論的健全性

マッピング健全性 [Micciancio-Warinschi'04]

各計算論的トレースに対して，圧倒的な確率で，
対応する記号トレースが存在する.

[Backes-Unruh'08] の概要

- 非対話ゼロ知識証明の記号モデルを提案

※ ゼロ知識証明に対する記号モデルの研究は, 最近になって始まった.

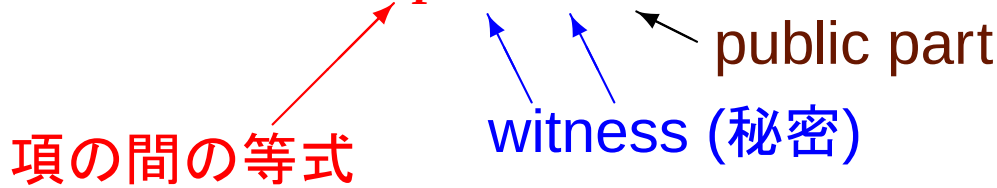
[Backes-Maffei-Unruh'08] (2008 IEEE Symposium on Security and Privacy)
"Zero-Knowledge in the Applied Pi-calculus and Automated Verification of the Direct Anonymous Attestation Protocol"

[Backes-Hriţcu-Maffei'08a] (FCS-ARSPA-WITS'08)
"Type-checking Zero-knowledge"

[Backes-Hriţcu-Maffei'08b] (CSF'08)
"Automated Verification of Remote Electronic Voting Protocols in the Applied Pi-calculus"

[Backes-Unruh'08] の概要

- 非対話ゼロ知識証明の記号モデルを提案
  - ゼロ知識証明を表す項 $\mathrm{ZK}^{R}_{F}(\underline{r};\ \underline{a};\ \underline{b})$



例: $F := \left(\beta_6 = \{\!\{\langle\langle \beta_7, \alpha_1\rangle, \alpha_2\rangle\}\!\}^{\rho_1}_{\mathrm{ek}(\beta_5)}\{\!\}^{\rho_2}_{\mathrm{ek}(\beta_4)}\right)$

  - ゼロ知識証明のための推論規則

$$\frac{\varphi \vdash \underline{a} \quad \varphi \vdash \underline{b} \quad R \in \mathrm{Rand}_{adv} \quad F \in \mathrm{Formula} \quad F\{\underline{r}, \underline{a}, \underline{b}\} \text{ is true} \quad \forall i : r_i \in \mathrm{Rand}_{adv} \vee (\exists t,\ a : \varphi \vdash \{\!| t |\!\}^{r_i}_{\mathrm{ek}(a)} \wedge \varphi \vdash \mathrm{dk}(a))}{\varphi \vdash \mathrm{ZK}^{R}_{F}(\underline{r};\ \underline{a};\ \underline{b})} \qquad \frac{\varphi \vdash \mathrm{ZK}^{R}_{F}(\underline{r};\ \underline{a};\ \underline{b})}{\varphi \vdash \underline{b}}$$

[Backes-Unruh'08] の概要

- 非対話ゼロ知識証明の記号モデルを提案
- 非対話ゼロ知識証明の安全性定義を提案
  - Completeness
  - Extractability
    (新たに提案, soundness よりも強い)
  - Extraction zero-knowledge
    ([Groth-Ostrovsky'07], zero-knowledge よりも強い)
  - Unpredictability
    (新たに提案)
  - これらを満たす具体的なスキームが存在する.

[Backes-Unruh'08] の概要

- 非対話ゼロ知識証明の記号モデルを提案
- 非対話ゼロ知識証明の安全性定義を提案
- この記号モデルの計算論的健全性を証明
  - マッピング健全性のみ
    - 「トレースの集合」で表される安全性に有効
      (例: completeness, extractability)
    - 「トレースの確率分布の間の識別不能性」で表される安全性にはあまり役立たない. (例: zero-knowledge)
  - 識別不能性の健全性は将来の課題

目次

- 汎用的結合可能性 (UC) の改良

  R. Küsters and M. Tuengerthal,
  “Joint State Theorems for Public-Key Encryption &
  Digital Signature Functionalities with Local Computation”

- 記号モデルの計算論的健全性

  M. Backes and D. Unruh,
  “Computational Soundness of Symbolic Zero-knowledge
  Proofs Against Active Attackers”

- FCCの話題

ゲーム列による安全性証明の自動検査

ゲーム列による安全性証明とは？

- 「攻撃者と挑戦者の間で行われるゲーム」として安全性を記述.
- 初期ゲームを次々に変換しながら,
  - 変換の前後で「攻撃者が勝つ確率」がほとんど変わらないこと
  - 最終ゲームで「攻撃者が勝つ確率」が無視できること

  を証明することにより,
  - 初期ゲームで「攻撃者が勝つ確率」が無視できること

  を証明する.

ゲーム列による安全性証明の自動検査

CryptoVerif と異なる目的で設計された２つの検査器

- 「ユーザが用意したコードベースの安全性証明」を機械的に検査.
- 自動証明は行わない.
- 「安全性証明の計算論的妥当性」をより厳密に保証する.

- G. Barthe, B. Grégoire, R. Janvier, F. Olmedo, S. Z. Béguelin
  “Formal Certification of Code-Based Cryptographic Proofs”

- M. Backes, M. Berg and D. Unruh
  “A Formal Language for Cryptographic Pseudocode”

ゲーム列による安全性証明の自動検査

CryptoVerif と異なる目的で設計された２つの検査器

- 「ユーザが用意したコードベースの安全性証明」を機械的に検査.
- 自動証明は行わない.
- 「安全性証明の計算論的妥当性」をより厳密に保証する.

- G. Barthe, B. Grégoire, R. Janvier, F. Olmedo, S. Z. Béguelin
  “Formal Certification of Code-Based Cryptographic Proofs”
  - 定理証明器 Coq を用いる検査器 CertiCrypt
  - 適用例: ElGamal, OAEP, Full Domain Hash lemma
- M. Backes, M. Berg and D. Unruh
  “A Formal Language for Cryptographic Pseudocode”
  - 定理証明器 Isabelle/HOL を用いる検査器
  - CertiCrypt よりも記述力がある. (オラクルや情報量的安全性)

情報流解析の計算論的健全性

情報流解析とは？

- 機密情報の流出を調べるためのプログラムの解析

非干渉性: 識別不能性として定義

- 機密度の高いデータを変更してプログラムを実行しても,
  機密度の低いデータが影響を受けないという性質.

情報流解析の計算論的健全性

- C. Fournet, G. L. Guernic and T. Rezk

  “A Cryptographic Compiler for Information-Flow Security”

  - 分散プログラムが信頼性の低い共有メモリを介して通信する.
  - 暗号技術を利用して情報流安全性ポリシーを実現する.

    ||

    機密情報が流出しない

情報流解析の計算論的健全性

- C. Fournet, G. L. Guernic and T. Rezk

  “A Cryptographic Compiler for Information-Flow Security”

  - 分散プログラムが信頼性の低い共有メモリを介して通信する.
  - 暗号技術を利用して情報流安全性ポリシーを実現する.
  - 「安全性の注釈を書ける小さな命令型言語のコード」を
    「暗号ライブラリを用いる分散 F# のコード」に変換するコンパイラ

情報流解析の計算論的健全性

- C. Fournet, G. L. Guernic and T. Rezk

  “A Cryptographic Compiler for Information-Flow Security”

  - 分散プログラムが信頼性の低い共有メモリを介して通信する.
  - 暗号技術を利用して情報流安全性ポリシーを実現する.
  - 「安全性の注釈を書ける小さな命令型言語のコード」を
    「暗号ライブラリを用いる分散 F# のコード」に変換するコンパイラ
    - 「命令型言語のコード」: 共有メモリの読み書きのための情報流安全性ポリシーを注釈として記述.
    - 「分散 F# コード」: 情報流安全性ポリシーを強制するために, 暗号化や署名生成の命令が挿入されている.
  - 型システムが 命令の挿入の正しさ (計算論的な非干渉性) を保証.

FCC その他

- H. Comon-Lundh and V. Cortier,
  “Computational soundness of observational equivalence”
- P. Adao, C. Fournet, N. Guts and F. Z. Nardelli,
  “High-Level Programming for E-Cash (work in progress)”
- K. Bhargavan, R. Corin, C. Fournet and E. Zalinescu,
  “Cryptographically Verified Implementations for TLS”
- C. Ene, J. Courant, Y. Lakhnech, M. Daubignard and P. Lafourcade,
  “Automated Proofs for Asymmetric Encryption”
- A. Jaggard, C. Meadows, M. Mislove and R. Segala,
  “Task Probabilistic Input/Ouput Automata as Domains”
- A. Datta, J. Halpern, J. Mitchell, R. Pucella and A. Roy,
  “Reasoning about Conditional Probability and Concrete Security in Protocol Proofs (Work in Progress)”

ご清聴ありがとうございました.