

EthereumにおけるVOLE-in-the-Headの検証コスト評価

津田匠貴
Nyx Foundation

December 1, 2025

Abstract

Vector Oblivious Linear Evaluation (VOLE) は、二者間で線形関係を秘匿したまま、ある種の相関性を検証するための零知識証明である。一方で、VOLE の実装コストが高いため、Ethereum での実装は困難である。そこで、VOLE を Ethereum 上で実装するための方法として、VOLE-in-the-Head (VOLE-itH) が提案される。VOLE-itH は、従来の零知識証明と比較して、線形演算を VOLE プリプロセスに組み込むことで、検証コストを大幅に削減することができる。本研究では、VOLE-itH の実装ベースとして、(1) 証明生成・検証の計算量と証明サイズを SNARK (Groth16) で圧縮した上で Ethereum verifier を実装し、そのガスコストを評価した。また、SHA-256/Keccak-F/基本論理回路でベンチマークした結果、VOLE-itH の証明生成は Circom 実装より最大 15.5× 高速だが、証明サイズは 6000× 増大した。SNARK で圧縮すると証明サイズを 1,055 バイトに固定でき、オンチェーン検証は xxx gas で完了した。これらの結果から、VOLE-itH をブロックチェーン応用に適用する際のコスト・パフォーマンスを評価した。

1 序論

1.1 Ethereumにおけるプライバシーとゼロ知識証明の役割

Ethereumは、スマートコントラクト¹と呼ばれるプログラムを実行できる分散型プラットフォームである。この透明性はシステムの信頼性を担保する一方で、すべての取引記録が公開台帳（ブロックチェーン）上に記録されるため、これにより、どのアドレスからどのアドレスへ、いつ、どれだけの資産が移動したかを誰でも追跡可能となる。

このプライバシーの欠如という課題に対する強力な解決策として、ゼロ知識証明（Zero-Knowledge Proof, ZKP）が注目されている。ZKPは、「ある秘密の情報を知っている」といふことを示す方法であり、この性質を利用して、ユーザーは自身の取引の詳細を秘匿したまま、その取引が正当であることを証明する。

Ethereum上でZKPを活用した代表的なアプリケーションに、プライバシーミキサーであるTornado Cashがある。Tornado Cashでは、ユーザーは資産を共通のプールに預け入れ、後で全く新しいアドレスへ出金する。このとき、ユーザーは「自分がある金額をプールに預け入れた正当な預金者である」ことをZKPで証明する。この証明には、預け入れ時のどのアドレスとも結びつく情報が含まれないため、預け入れと引き出しが可能となる。

このようなアプリケーションを実現するには、Ethereum上でZKPを検証する仕組み、すなわち、オンチェーン検証のプロセスは、一般的に以下の手順で行われる。(1) ユーザーが自身のデバイス上でZKPを生成する。(2) この証明を、Ethereum上にデプロイされた検証者スマートコントラクトにトランザクションとして送信する。(3) スマートコントラクトは、受け取った証明が有効であるかを検証し、有効であれば後続の処理を実行する。

しかし、このオンチェーン検証には二つの大きな課題が存在する。

第一の課題は、オンチェーン検証のコストと制約である。スマートコントラクトでの計算実行時間とガス代が高くなる。また、検証アルゴリズムが複雑であったり、証明のデータサイズが大きかったりすると、ガス代は著しく増加する。

第二の課題は、クライアントサイドでの証明生成の負荷である。アプリケーションが広く普及しているが、多くの既存のZKP技術（特にzk-SNARKs）は、検証の軽量性と引き換えに、証明生成に膨大な計算資源が必要である。

したがって、理想的な証明システムは、これら二つの課題を同時に解決する必要がある。すなわち、VOLE-in-the-Head (VOLEitH) のような対称鍵暗号ベースの証明システムは、特に証明生成の軽量化とガス代の削減に寄与する。

1.2 VOLEベースZKPとVOLE-in-the-Head

VOLE (Vector Oblivious Linear Evaluation) は、セキュア多者計算 (MPC: Secure Multi-Party Computation) の分野、特にYao's Garbled Circuit (GC) とOblivious Transfer (OT) の研究から派生した暗号学的プリミティブである。

これは、二者間で線形関係を秘匿したまま特定の相関を生成することを可能にする。その後、この技術が拡張され、これにより、従来のSNARKs (Succinct Non-Interactive Argument of Knowledge) で主流であった zk-SNARKs (Zero-Knowledge Succinct Non-Interactive Argument of Knowledge) とは異なるアプローチを取り、特に証明者の計算負荷を軽減することに成功した。

その中でもVOLE-in-the-Head (VOLEitH) は、VOLEベースの対話型プロトコルにFiat-Shamir変換を適用することで、誰でも検証可能な公開証明 (publicly verifiable proof) を生成可能にした画期的な手法である[1]。これにより、証明者側の高い計算効率とガス代の削減が実現される。

1.3 研究の目的と貢献

VOLEitHは理論的には有望であるものの、その実用性、特にオンチェーン検証における具体的な性質について検証する。本研究の目的は、VOLEitHの特性を活かした軽量な証明者がEthereum上で検証することが可能である。

¹契約の条件確認や履行を自動的に強制するコンピュータプログラム。ブロックチェーン上で実行される。

²Ethereumネットワーク上でトランザクションを実行するために必要な手数料。計算が複雑であるほど高額になる。

具体的には、以下の項目を詳細に測定・分析する。

- ・証明生成と検証にかかる時間
- ・生成される証明のサイズ
- ・証明者と検証者の計算負荷（CPU、メモリ）
- ・最終的なオンチェーン検証にかかるガス代

本研究は、VOLEitHのオンチェーン応用における実現可能性と技術的なトレードオフを明らかにす

2 前提知識と関連研究

本章では、後続のベンチマークと考察を理解するために必要な暗号学的的前提を簡潔に整理する。

2.1 Vector Oblivious Linear Evaluation (VOLE)

Vector Oblivious Linear Evaluation (VOLE) は、二者間で線形関係を秘匿したまま、ある種の相手 k をセキュリティパラメータ、 \mathbb{F}_{2^k} を要素数 2^k の有限体とする。証明者 (Prover) はベクトル $\mathbf{u} \in \mathbb{F}_2^\ell$ と $\mathbf{v} \in \mathbb{F}_{2^k}^\ell$ を、検証者 (Verifier) はグローバルキー $\Delta \in \mathbb{F}_{2^k}$ を入力とする。

プロトコル終了後、検証者は $\mathbf{q} \in \mathbb{F}_{2^k}^\ell$ を得て、証明者は (\mathbf{u}, \mathbf{v}) を、検証者は (Δ, \mathbf{q}) を保持する。これより

$$q_i = u_i \cdot \Delta + v_i \quad (i = 0, \dots, \ell - 1) \quad (1)$$

この相関は、 u_i に対する線形準同型コミットメントとして機能する。

秘匿性 (Hiding) 検証者は q_i から u_i の情報を得られない。これは、証明者が知るランダムな値 v_i が u_i に影響を与えないことを示す。

拘束性 (Binding) 証明者は、コミットした u_i とは異なる値 u'_i を開示することができない。これを行

2.2 VOLE-based ZK

VOLEの持つ線形性（加法準同型性）を利用してことで、効率的なゼロ知識証明プロトコル (VOLE-based ZK) を構築できる。このパラダイムに基づく代表的なプロトコルとしてQuickSilver[9]がある。VOLEベースの証明は、事前にVOLE相関をバッチ生成 (pre-processing) しておき、オンラインで検証する。しかし、従来のVOLE-ZKプロトコルは、その健全性 (Soundness) を保証するために、検証者による検証が複数回必要となる。そのため、証明を検証できるのが特定の検証者に限定される指定検証者証明 (Designated Verifier Proof) となり、第三者が検証できる公開検証可能性 (Public Verifiability) を持たないという課題があった。

2.3 VOLE-in-the-Head

VOLE-in-the-Head (VOLEitH) は、上記のような指定検証者型のVOLE-ZKプロトコルを、非対話かつ公開検証可能なゼロ知識証明 (NIZK) に変換するためのコンパイラ。VOLEitHは、MPC-in-the-HeadパラダイムとVOLEを組み合わせたもので、証明の健全性を单一の

VOLEitHの核となるアイデアは、検証者が秘密情報 (Δ) を持つ代わりに、証明者自身がコミットShamir変換[10]によって Δ を導出する点にある。

1. コミットメント: 証明者は、VOLE相関の元となるシード (seed) のベクトルにコミットする。but-Oneベクトルコミットメントが用いられ、単一のハッシュ値で多数のシードをコミットする。
2. チャレンジ生成: 証明の主要部分が生成された後、Fiat-Shamir変換を用いて、証明全体のトランザクションを生成する。
3. 開示と検証: Δ が定まった後、証明者はコミットメントを開示する。All-but-Oneコミットメントの性質により、 N 個のシードのうち $N-1$ 個を $O(\log N)$ の通信量で開示する。

検証者は、開示された情報と自身で計算した Δ を用いてVOLE相関式を検証する。これにより、検証者の正しさが確認される。

2.4 クライアントサイドプルーフィング

ゼロ知識証明を応用したアプリケーションが広く普及するためには、エンドユーザーが自身のデータを保護しながら、特別な高性能ハードウェアを必要とせずに、プライバシーを保護しながら自身の正当性 (Experience) の鍵となる。

しかし、多くの証明システム、特にペアリングなどの公開鍵暗号に基づくzk-SNARKsは、証明生成に膨大な計算リソース (CPU、メモリ) を要求する傾向がある。複雑なアプリケーションの証明を生成しようとすると、数分から數十分の時間がかかったり、モバイル端末では電力消費が高くなったりする。

この課題に対し、VOLE-in-the-Headのような対称鍵暗号に基づく証明システムが解決策として提案される。これらのシステムは、AESなどハードウェアで高速に実行可能な対称鍵プリミティブを計算の基盤としている。この特性により、VOLEitHは計算資源の限られたクライアントデバイス上でも快適なUXを提供できる。

2.5 オンチェーン検証

オンチェーン検証とは、ブロックチェーン上で暗号学的証明の正当性を検証するプロセスを指す。ブロックチェーンは透明性が高い反面、すべてのアクションが公開台帳に記録されるため、ユーザーは個人情報を一切明かすことなく、「ある条件を満たす」ということを証明する。これにより、プライバシーを保った金融取引などが可能となる。

本稿では特に、Ethereum[11]仮想マシン (EVM) 上でzk-SNARKの証明を検証するケースを扱う。Ethereumは、スマートコントラクトと呼ばれるプログラムを実行できる分散型プラットフォームである。さらに、ブロックには含められるデータ総量 (ブロックガスリミット) に上限があるため、証明サイズが大きくなる。これらの制約から、オンチェーンでの利用には、証明サイズが極めて小さく (簡潔、Succinct)、

この文脈でGroth16が広く採用されるのは、その証明サイズが小さい (回路の規模に関わらずデータを効率的に送信する) ため、これらの特性は大きな利点となる。

Ethereum上でGroth16の証明を検証するには、Solidityで記述された検証コントラクトが用いられる。この検証ロジックは、Ethereumに予め組み込まれたプリコンパイル済みコントラクトを利用する。具体的には、アドレス ‘0x08’ に配置された ‘ecPairing’ というプリコンパイル済みコントラクトがある。

検証のプロセスは以下の通りである。まず、開発者は証明対象の回路に対応する検証鍵（Verifier Key, vk ）を含むスマートコントラクト（例: Verifier.sol）を Ethereum にデプロイする。次に、証明を検証したいユーザーは、証明（ $proof, \pi$ ）と公開入力（public inputs）をトランザクションとして検証コントラクトに送信する。検証コントラクトは、受け取ったこの結果に基づき、コントラクトは後続の処理（状態の更新や別のコントラクト呼び出しなど）を実行する。このようなオンチェーンZKアプリケーション開発において、Circomは算術回路を記述するための言語であり、これにより、開発者は複雑なペアリング演算のロジックを自ら実装することなく、効率的にオンチェーンで実行可能にする。

2.6 Groth16

まず、Groth16を理解するために、zk-SNARKs (zero-knowledge Succinct Non-interactive ARguments of Knowledge) について説明する。zk-SNARKsは、以下の性質を持っています。

- ・ ゼロ知識 (Zero-Knowledge): 証明が「あるステートメントが真である」という事実以外の情報を示さない。
- ・ 簡潔性 (Succinctness): 証明のサイズが非常に小さく、検証時間が短い。これにより、検証コストが大幅に削減される。
- ・ 非対話性 (Non-interactive): 事前の一度きりのセットアップの後、証明者と検証者の間でインタラクションが不要となる。
- ・ 知識の論拠 (ARgument of Knowledge): 証明者が実際に秘密の入力 (witness) を知っていることを示す。

Groth16は、このようなzk-SNARKsの中でも特に効率的で広く利用されている方式の一つであり、ブロックチェーンのように検証コストが重視される環境において、特に強力な選択肢となる。

Groth16プロトコルは主に3つのアルゴリズムから構成される：

Setup 回路（通常はR1CS形式）から、証明鍵（Proving Key, pk ）と検証鍵（Verification Key, vk ）を生成する。このプロセスは回路ごとに一度だけ実行する必要があり、信頼できる初期化（Trusted Setup）を必要とする。このセットアップで用いられた乱数（“toxic waste”）が漏洩すると、不正な証明が生成可能になるという課題がある。

Prove 証明者は、証明鍵、公開入力（witness）、および秘密入力を用いて、証明（ $proof, \pi$ ）を生成する。

Verify 検証者は、検証鍵、公開入力、および証明 π を受け取り、その正当性を検証する。

Groth16の証明は、特定の楕円曲線（例: BN254）上の3つの群要素（ \mathbb{G}_1 の元2つ、 \mathbb{G}_2 の元1つ）を用いて構成される。検証は、数回のペアリング演算によって行われ、極めて高速に完了する。

この効率性の代償として、回路ごとに異なるTrusted Setupが必要であり、汎用性（universality）を失う。

3 ベンチマーク設計

本章では、VOLEitHとSNARKを組み合わせたアーキテクチャの性能を定量的に評価するために設計したベンチマークを紹介する。

3.1 測定項目

本研究では、証明システムの性能と実用性を多角的に評価するため、以下のメトリクスを測定対象とした。

メトリクス	説明
証明生成時間	証明者が、ある計算に対する証明を生成するために要する時間
証明検証時間	検証者が、与えられた証明の正当性を検証するために要する時間
証明サイズ	生成された証明データの大きさ
通信オーバーヘッド	非対話型証明において、証明者が検証者に送信する必要がある総データ量
計算負荷	証明生成および検証プロセス中に消費されるCPU使用率および最大メモリ使用量
SNARK制約数	VOLEitHの証明をSNARKに変換する際に生成されるR1CSの制約数。
オンチェーン検証ガス代	生成されたSNARK証明をEthereumのスマートコントラクトで検証するガス代

Table 1: ベンチマーク測定項目一覧

3.2 評価環境

すべてのベンチマークは、以下の統一された環境で実施した。

- ・ ハードウェア:
 - CPU: Apple M1
 - メモリ: 16GB
- ・ ソフトウェア:
 - 言語: Rust
 - ベンチマークツール: cargo bench
 - VOLEitH実装: soft_spoken ライブラリ
 - スマートコントラクト開発・テスト: Foundryフレームワーク
 - Solidityバージョン: 0.8.20

3.3 評価対象回路

本ベンチマークでは、プロトコルの基本的な性能と、より実践的な応用における性能の両方を評価する。

- ・ SHA256回路:
 - 内容: SHA-256。これらは暗号技術で広く利用される標準的なハッシュ関数であり、複数のゲートで構成される。
 - 形式: これらの回路は、Bristol Fashion形式で記述されたものを、本研究で利用するVC形式に変換する。
 - 目的: VOLEitHプロトコル単体の性能と、既存のZKP実装（Circom）との比較評価に用いる。
- ・ E2E評価用基本回路:
 - 内容: 100ゲートおよび1000ゲートのADD（加算）回路とAND（乗算）回路。
 - 目的: エンドツーエンド（E2E）の性能評価、特に回路の規模（ゲート数）と種類（加算、乗算）を評価する。

4 結果と分析 (Results and Analysis)

本章では、設計したベンチマークに基づき、VOLEitHの性能を多角的に評価する。まず4.1節でVOLEitHの構造を説明し、次に4.2節で、VOLEitHの証明をSNARKで圧縮しオンチェーン検証するまでのエンドツーエンドのプロセスを示す。

4.1 VOLEitH単体性能評価

VOLEitHプロトコル自体の性能を評価するため、標準的な暗号学的ハッシュ関数であるSHA-256とKeccak-Fの回路を用いてベンチマークを実施した。これらの回路はBristol Fashion形式で記述されたものを本研究用に変換したものである。

表1に、Apple M1（メモリ16GB）環境で測定した両回路のベンチマーク結果を示す。

Table 2: VOLEitH単体性能ベンチマーク (SHA-256 vs Keccak-F)

Metric	sha256	keccak_f
Proof Generation Time	95 ms	143 ms
Proof Verification Time	51 ms	74 ms
Proof Size	4,927,342 B (~4.9 MB)	8,416,569 B (~8.4 MB)
Communication Overhead	4,927,407 B (~4.9 MB)	8,416,634 B (~8.4 MB)
Prover Computation Load	0.02% CPU, 118.23 MB	0.04% CPU, 154.14 MB
Verifier Computation Load	0.04% CPU, 138.89 MB	0.04% CPU, 158.1 MB

表2から、回路の複雑性が性能に直接的な影響を与えることがわかる。

Keccak-FはSHA-256よりも複雑な回路構造を持つため、証明生成時間、検証時間、そして証明サイズはSHA-256を上回るコストが必要となった。特筆すべきは証明サイズであり、SHA-256で約4.9MB、Keccak-Fでは約8.4MBにも達する。この巨大なデータサイズは、そのままでは実装が困難となる。

次に、VOLEitHの性能特性をより明確にするため、既存のZKP実装であるCircom ([5]より) とSHA-256実装との比較を行う。表2に両者の性能比較を示す。

Table 3: SHA-256実装の性能比較 (VOLEitH vs Circom)

実装	証明生成時間	証明サイズ
VOLEitH (本研究)	95 ms	~4.9 MB
Circom (先行研究)	~1,473 ms	~821 Bytes

表3は、VOLEitHの基本的なトレードオフを明確に示している。証明生成時間において、VOLEitHはCircomよりも速い。これは、証明者の計算効率を重視するVOLEベースのプロトコルの特性を強く反映している。

一方で、証明サイズに目を向けると、VOLEitHの証明は約4.9MBであるのに対し、Circom (Groth16) の証明サイズは約821Bytesである。

この結果から、VOLEitHはクライアントデバイスのような計算資源が限られた環境での高速な実装が可能であることが示される。ただし、この「証明は高速だが、証明自体が巨大」という課題が、本研究でSNARKによる証明圧縮アプローチによって解決される。

4.2 エンドツーエンド (E2E) 性能評価

前節でVOLEitH単体では証明サイズが大きすぎるという課題が明らかになったため、本節ではVOLEitHのE2E性能を評価する。ベンチマークは、100ゲートおよび1000ゲートのADD回路とAND回路を用いて実施した。

まず、VOLEitHフェーズの性能を表3に示す。

Table 4: E2Eベンチマーク - VOLEフェーズの性能

Metric	100 add	100 and	1000 add	1000 and
Proof Gen. Time	279.012 μ s	476.5 μ s	790.062 μ s	1.649 ms
Proof Ver. Time	68.75 μ s	274.566 μ s	585.6 μ s	1.082 ms
Proof Size	21,361 B	42,491 B	21,319 B	233,175 B
Comm. Overhead	21,426 B	42,556 B	21,384 B	233,240 B

表4から、VOLEフェーズにおいては、回路のゲート数が増加するにつれて、証明生成時間、検証時間とともに増加する傾向がある。特に、ANDゲート回路はADDゲート回路と比較して、同程度のゲート数であっても証明生成時間が長い。これは、soft_spokenの実装において、ANDゲートのような乗算処理がADDゲートのような加算処理よりも複雑であるためである。

次に、SNARKフェーズの性能を表4に示す。このフェーズでは、VOLEitHの証明をSNARK (

Table 5: E2Eベンチマーク - SNARKフェーズの性能

Metric	100 add	100 and	1000 add	1000 and
Proof Gen. Time	272 ms	1,794 ms	324 ms	8,003 ms
Constraints	86,080	3,471,680	86,080	33,942,080
Proof Size	1,055 B	1,055 B	1,055 B	1,055 B
Gas Cost	208,967	208,967	208,967	208,967

表5から、SNARKフェーズではVOLEフェーズとは異なる特性が明らかになる。最も注目すべきは、最終的なSNARK証明のサイズが、回路のゲート数や種類に関わらず1,055バイトである。また、オンチェーン検証のガス代も208,967 gasで一定であり、これはSNARKの検証が固定コストであることを示している。これにより、前節で課題となったVOLEitHの巨大な証明サイズが大幅に圧縮され、オンチェーン検証の実行効率が向上する。

一方で、SNARK証明の生成時間と制約数には、回路の複雑性が大きく影響している。特に、ANDゲート回路では、制約数が33,942,080に達し、証明生成に8,003 ms（約8秒）を要している。

この関係性をより視覚的に示すため、図1にSNARKの制約数と証明生成時間の関係を示す。

Figure 1: SNARKの制約数と証明生成時間の関係

図1は、SNARKの証明生成時間が、回路の制約数、特に乗算ゲートに起因する制約数の増加に比例する。これは、SNARKの証明生成における主要な計算ボトルネックが、回路の複雑性、特に乗算の多さによるものである。

主な観測事項 本章で得られたE2E測定結果から、以下の特徴が明らかになった。

- ANDゲートはADDゲートよりも大幅に制約数と証明時間を増加させ、VOLEフェーズでも証明時間はANDゲート回路の方が長い。
- ADDのみの回路では制約数がほぼ一定であるのに対し、ANDゲート数に比例してSNARK制約数が増加する。
- SNARKフェーズの証明生成時間が、VOLEフェーズの生成・検証時間を大きく上回り、全体の約8割を占める。
- SNARK証明サイズおよびオンチェーン検証ガスは1,055バイトと約209k gasで一定であり、回路規模に依存しない。

- ・ 総証明時間はSNARKフェーズの制約増加に強く影響されるため、複雑な回路ではクライアント側で計算が複雑化する。

4.3 SNARK統合に関する洞察

VOLEitHの証明をGroth16で包むと、証明サイズと検証コストは一定になる一方で、R1CS制約数についてここでは制約数の内訳と、制約爆発の要因および緩和策を整理する。

4.3.1 制約数の分解

n を拡張witnessの長さ（秘密入力数と乗算ゲート数の合計）とすると、全体の制約数は

$$16,640 \times n + 2,113,664$$

と表せる。線形項に寄与するガジェットは表6の通りであり、compute_validation_aggregateが支

Table 6: 線形に増加するガジェットの制約数

ガジェット	制約数
<i>compute_d_delta</i>	$128n$
<i>compute_masked_witness</i>	$256n$
<i>compute_validation_aggregate</i>	$16,512n$
合計	$\approx 16,640n$

また、回路サイズに依存しない定数項も無視できない（表7）。乗算ゲートが増えると線形項が

Table 7: 定数項として加算されるガジェット

ガジェット	制約数
<i>combine</i>	$\sim 2,097,152$
<i>compute_actual_validation</i>	$\sim 16,384$
最終整合性チェック	~ 128
合計	$\sim 2,113,664$

4.3.2 Field Mappingがもたらす制約爆発

SchmivitzにおけるVOLEitHは、 \mathbb{F}_2 、 \mathbb{F}_{2^8} 、 $\mathbb{F}_{2^{64}}$ 、 $\mathbb{F}_{2^{128}}$ といった2進拡大体上で計算を行う。一方で、Groth16のR1CSはBN254の素数体上で定義されるため、各ビット列をBoolean変数列に実装では以下のように、証明内の各値を逐一Boolean配列に射影している。

```
pub fn build_circuit(
    cs: ConstraintSystemRef<Bn254Fr>,
    proof: Proof<InsecureVole>,
) -> VoleVerificationBoolean {
    let witness_commitment_booleans: Vec<Vec<Boolean<Bn254Fr>>> = proof
        .witness_commitment
```

```

    .iter()
    .map(|value| f64b_to_boolean_array(cs.clone(), value).unwrap())
    .collect();

let witness_challenges_booleans: Vec<Vec<Boolean<Bn254Fr>>> = proof
    .witness_challenges
    .iter()
    .map(|value| f128b_to_boolean_array(cs.clone(), value).unwrap())
    .collect();
    // ...
}

```

この変換により、もともと単一の体要素で表現できた計算が数百ビットのAND/XORに展開される。

4.3.3 ANDゲートとwitness_challenge

特にANDゲートを検証する際には、witness_challengeとmasked_witnessの全ビットについてANDゲートを実装の核心は以下の通りであり、128ビット平方の積をBooleanレベルで計算するため、ANDゲートを実装する。

```

for (i, challenge_bit) in challenge.iter().enumerate() {
    if i >= 128 { break; }
    for (j, masked_bit) in masked_witness.iter().enumerate() {
        if j >= 128 || i + j >= 128 { continue; }
        let and_result = Boolean::and(challenge_bit, masked_bit)?;
        product[i + j] = Boolean::xor(&product[i + j], &and_result)?;
    }
}

```

ADDゲートではwitness_challengeが不要なため制約数は一定だが、ANDゲートが増えるほど制約数が増加する。

4.4 技術的ボトルネックと解決策

上記の分析から、Field MappingとGGM木再構成が制約爆発の主要因であることが分かる。本節では、これらを緩和するための具体的な研究方向を整理する。

4.4.1 Field Mapping最適化とLookup Table

Mystique[6]は、機械学習向けに \mathbb{F}_2 と \mathbb{F}_p のデータ変換を効率化するVOLEベースZKであり、Lookup Table (LUT) を導入することでさらに高速化できることが最新研究[7]で示されている。表8に示す通り、LUTを用いた場合には実行時間が61-130倍短縮し、通信量も最大2.9倍削減でき、VOLEitHのField MappingにMystique型LUTを適用できれば、SNARKフェーズの制約数削減に直結する。

Table 8: MystiqueとLUT拡張の性能比較

関数	プロトコル	実行時間 (s)	通信量 (MB)
指數関数	Mystique with LUT	8.696	99.020
	Mystique	1130.020	291.435
除算	Mystique with LUT	9.837	110.684
	Mystique	617.690	160.428
逆平方根	Mystique with LUT	11.836	147.903
	Mystique	824.639	212.211

4.4.2 GGM木最適化とFolding

Schmivitzでは、VOLEitH検証で最もコストの高いGGM木再構成を簡略化しているが、SNARKでは著者らはGGM木を効率化する手法[8]に加え、FAESTを改良したFAESTERを提案しており、署名本研究で検討したFoldingスキームとこれらの最適化を組み合わせれば、将来的にGGM木再構成部

Table 9: FAESTとFAESTERの比較（セキュリティ128ビット）

スキーム	バージョン	署名サイズ (B)	署名時間 (ms)	検証時間 (ms)
FAEST	Slow	50,063	4.3813	4.1023
	Fast	63,363	0.4043	0.3953
FAESTER	Slow	45,943	3.2823	4.4673
	Fast	60,523	0.4333	0.6103

4.5 総合考察とトレードオフ分析

これまでの分析結果を統合し、VOLEitHとSNARKを組み合わせたアーキテクチャ全体の有効性と、本研究で採用したアーキテクチャは、図2に示すように、証明者側（Prover）で2段階のプロセス

Figure 2: VOLEitH + SNARKによる証明圧縮プロセスの概念図

図2が示す通り、本アーキテクチャは、VOLEitHが生成する巨大な証明（数MBオーダー）を、このアプローチにより、以下の2つの大きな利点を両立することが可能となる。

- 高速な証明者計算: VOLEitHは、Circumのような従来のR1CSベースのシステムと比較して、これにより、計算能力が限られるクライアントデバイス（例: Webブラウザ、スマートフォン）
- 低コストなオンチェーン検証: SNARK化された証明は、サイズが小さく、検証コストが回路

一方で、このアーキテクチャには考慮すべきトレードオフも存在する。最大のトレードオフは、証明者は、高速なVOLEitH証明生成に加えて、SNARK証明を生成するための追加の計算コストを特に、回路が多く乗算（ANDゲート）を含む場合、SNARKの制約数が急増し、SNARK証明の生成時間がかかる。したがって、本アーキテクチャは、以下のような特性を持つユースケースにおいて特に有効である。

- クライアントサイドでの証明生成: ユーザー自身のデバイスで証明を生成し、サーバーやプロトコルを保護した上で本人確認（分散型ID）、プライバシーを保持する。

- ・オンチェーンコストの最小化が重要: ブロックチェーンのスケーラビリティが重視され、トランザクションの処理速度が求められる。

結論として、VOLEitHとSNARKを組み合わせたハイブリッドアプローチは、「証明者の高速性」と「証明の正確性」を両立する。その性能は回路の特性、特に乗算の数に大きく依存するため、アプリケーションを設計する際には注意が必要である。

5 結論と今後の展望 (Conclusion and Future Work)

5.1 結論

本研究では、証明者効率の高いVOLE-in-the-Head (VOLEitH) プロトコルと、証明圧縮に優れたSNARKを組み合わせたハイブリッドアプローチを提案した。ベンチマークを通じて、以下の主要な知見が得られた。

1. VOLEitHの基本的なトレードオフ: VOLEitHは、CircomのようなR1CSベースのシステムと比較して、より高速である一方で、この巨大な証明は、単体ではオンチェーン検証の大きな障壁となる。
2. SNARK圧縮の有効性: VOLEitHの証明をSNARK (Groth16) で圧縮することにより、回路の構造が変更される。これにより、VOLEitHのオンチェーン応用の道が拓かれる。
3. アーキテクチャのボトルネック: エンドツーエンドのプロセスにおける主要なボトルネックは、データの変換と検証プロセスである。

結論として、VOLEitHとSNARKを組み合わせたハイブリッドアプローチは、「クライアントサイドの実行」と「サーバー側の検証」を効率的に実現する。本研究は、その具体的な性能データとトレードオフを明らかにすることで、このアプローチの実用性を示すことができた。

5.2 今後の展望

本研究の成果を踏まえ、特に優先度の高い研究課題は以下の3点である。

1. Field Mapping最適化: Mystique型のデータ変換やLookup Tableを取り入れ、 \mathbb{F}_2 上の演算を効率化する。
2. GGM木再構成の高度化: FAESTERのような最適化とFoldingスキームを組み合わせ、検証プロセスを簡素化する。
3. 代替SNARK/証明システムの検討: BinusやRecursive SNARKなど、二進演算に適した新しいSNARK構造を検討する。

これらに加えて、以下のエンジニアリング課題にも継続的に取り組む必要がある。

- ・ SNARK証明生成の最適化: VOLEitHからR1CSへの変換フローを高速化し、Plonk/Halo2との互換性を確保する。また、SNARKやSolidity verifierのガス最適化を検討する。
- ・ アプリケーション駆動の評価: 分散型ID、プライベートトランザクション、オンチェーンゲートウェイなどの実用性を評価する。
- ・ セキュリティ整合性の確保: VOLEitHはLPN仮定に基づくポスト量子耐性を持つ一方で、Groth16のセキュリティを確保する。

参考文献 (References)

References

- [1] Baum, C., et al. Publicly Verifiable Zero-Knowledge and Post-Quantum Signatures from VOLE-in-the-Head. Cryptology ePrint Archive, Paper 2023/996, 2023. <https://eprint.iacr.org/2023/996>.
- [2] Groth, J. On the Size of Pairing-based Noninteractive Arguments. In EUROCRYPT 2016, pp. 305-326, 2016. DOI: 10.1007/978-3-662-49896-5_11.
- [3] Gabizon, A., Williamson, Z. J., and Ciobotaru, O. PLONK: Permutations over Lagrange-bases for Oecumenical Noninteractive arguments of Knowledge. IACR Cryptology ePrint Archive, 2019.
- [4] Grassi, L., et al. Poseidon: A New Hash Function for Zero-Knowledge Proof Systems. In USENIX Security Symposium, 2021. <https://www.usenix.org/conference/usenixsecurity21/presentation/grassi>.
- [5] Iden3. Circom: A Circuit Compiler for Zero-Knowledge Proofs. Cryptology ePrint Archive, Paper 2023/681, 2023. <https://eprint.iacr.org/2023/681>.
- [6] Haitner, Y., et al. Mystique: Efficient Conversions for Zero-Knowledge Proofs with Applications to Machine Learning. Cryptology ePrint Archive, Paper 2021/730, 2021. <https://eprint.iacr.org/2021/730>.
- [7] Fu, H., et al. Scalable Zero-knowledge Proofs for Non-linear Functions in Machine Learning. Cryptology ePrint Archive, Paper 2025/507, 2025. <https://eprint.iacr.org/2025/507>.
- [8] Beullens, W., et al. One Tree to Rule Them All: Optimizing GGM Trees and OWFs for Post-Quantum Signatures. Cryptology ePrint Archive, Paper 2024/490, 2024. <https://eprint.iacr.org/2024/490>.
- [9] Yang, K., Kohl, P., and Song, D. QuickSilver: Efficient and Affordable Zero-Knowledge Proofs for Circuits and Polynomials. In Proceedings of the ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security (CCS '21), pp. 233-250, 2021. DOI: 10.1145/3460120.3484550.

- [10] Fiat, A., and Shamir, A. How to Prove Yourself: Practical Solutions to Identification and Signature Problems. In Advances in Cryptology – CRYPTO ’ 86, pp. 186-194, 1987. DOI: 10.1007/3-540-47721-7_12.
- [11] Wood, G. Ethereum: A Secure Decentralised Generalized Transaction Ledger. Ethereum Project Yellow Paper, 2024. <https://ethereum.github.io/yellowpaper/paper.pdf>.