ZoKrates
- Scalable Privacy-Preserving Off-Chain Computations

Jacob Eberhardt, Stefan Tai
TU Berlin

2020.05.06
이수연

Contents

Introduction

블록체인은 여러 분야에서 쓰이기에 걸림돌이 되는 challenge 존재

이 중에 확장성과 privacy는 실제로 활용되기 위해서는 극복해야하는 문제

확장성
- 블록체인 거래 >> 네트워크의 모든 노드에서 검증되고 처리
- 유효성 검증 및 처리에 필요한 모든 데이터가 모든 노드에서 사용가능

privacy
- public 블록체인 네트워크에서는 모든 데이터가 공개
- 기밀 정보 및 privacy 보호 가 필요한 경우 충돌이 발생

해결 방법 off-chain 제안

확장성과 privacy 를 모두 해결하기 위함

◆ **주요 아이디어**

블록체인 외부 리소스를 사용하여 블록체인의 계산 노력과 데이터 저장을 줄이는 것

➡ 블록체인의 기본 속성은 유지되어야 함

◆ **목표**

검증에 드는 비용을 줄여, 같은 비용으로 처리할 수 있는 거래량을 늘림

데이터는 공개되어 있지만 암호화되어 있어 privacy는 보호됨

그러면서도 이 데이터는 네트워크 상의 트랜잭션과 상호작용 가능

Contribution

기여 1 Non-interactive zero-knowledge proof 기반의 off-chain 처리 모델을 도입
블록 체인 시스템의 트랜잭션 처리량 및 privacy 보호를 향상

- ➡ off-chain에서 계산을 한 후 결과를 블록체인에 기록
- ➡ off-chain 계산 결과의 정확성을 증명하는 proof를 제공
- ➡ proof를 이용해 블록 체인에서 검증

proof 시스템이 만족해야하는 조건

a) proof 검증은 원래 계산의 (재)실행보다 더 빨라야 함

b) proof는 zero knowledge를 이용 즉, private 데이터를 공개하지 않고 증명할 수 있어야 함

Contribution

기여 2

zkSNARK를 proof 시스템으로 사용해 off-chain 처리 모델을 지원하는 소프트웨어 도구 set 인 ZoKrates를 소개

등장 원인

검증 체계에 적합한 암호화 기법이 있지만 블록 체인에 적용이 어려움

low level이고, 사용하기 어려운 환경에 적합한 연산이 필요

on-chain 검증은 매우 복잡 & 체계에 대한 해박한 지식 요구

Contribution

ZoKrates

- 개발자가 high level로 off-chain 계산을 편리하게 하는 도메인 별 언어를 정의
- proof 시스템의 low level 프로그래밍을 몰라도 연산 가능
  - ➡ domain-specific 코드를 검증 가능하도록 제한된 시스템으로 변환하는 컴파일러가 포함되어 있기 때문
- off-chain 프로그램을 실행하고 정확성을 증명하는 proof를 생성하는 데 도움
- 편리한 on-chain검증을 위해 Verification Smart Contract를 지원
  - ➡ off-chain 에서 생성 된 proof를 검증하고 off-chain 계산의 정확성을 확인
- Ethereum 블록 체인 대상이지만 설계 상으로는 다른 블록 체인 시스템과 호환 가능

2) zkSNARKs

Verifiable computation schemes 를 통해 신뢰할 수 없는 prover에게 계산을 위탁

prover : 계산을 수행하고 결과가 정확하다는 증거를 포함하여 결과를 반환

} 계산력이 약한 verifier에게 도움

ZkSNARK (zero-knowledge Succint Non-interactive ARguments of Knowledge) 주요 특성

- Set of Verifiable computation schemes
- proof는 짧고 non-interactivate
  - ➡ 즉, prover는 상호작용하지 않아도 verifier에게 확신을 줄 수 있음
- prover는 proof를 생성할 때 private 정보를 사용할 수 있으며 verifier는 해당 정보에 대해 알 수 없음
- 검증 비용은 입력의 계산 복잡성과 관계없음

2) zkSNARKs

- zkSNARK verification scheme 는
  다항식에 기반한 abstraction인 QAP (Quadratic Arithmetic Programs)에 정의
  ➡ Arithmetic Circuits 와 Rank-1-Constraint-Systems (R1CS)가 있음
- 산술 회로를 R1CS 및 QAP로 변환 할 수 있기 때문에 circuit이라고 부름

R1CS 프로그램을 미지수에 대한 set of condition 으로 인코딩

실행이 올바르다는 것은 조건을 만족하는 variable assignment을 찾는 것과 같음

이러한 임무를 witness 이라고 함

초기 단계로, proof creation 및 verification 에 사용되는 common reference string (CRS)을 작성하기 위해 신뢰할 수 있는 일회성 setup을 수행해야 함 ?

Off-chaining Computations

- off 체인을 이용하면 성능,비용적인 측면과 개인정보보호 측면에서 이점이 있음

- 암호화 해시를 블록체인에 올리고 그 데이터를 이용하는게 적절한 방법이지만 정보의 내용을 유지하면서 외부 노드로 연산을 옮기는게 쉽지 않음

  ➡ 결과를 신뢰 할 수 없기 때문

Off-chaining Computations

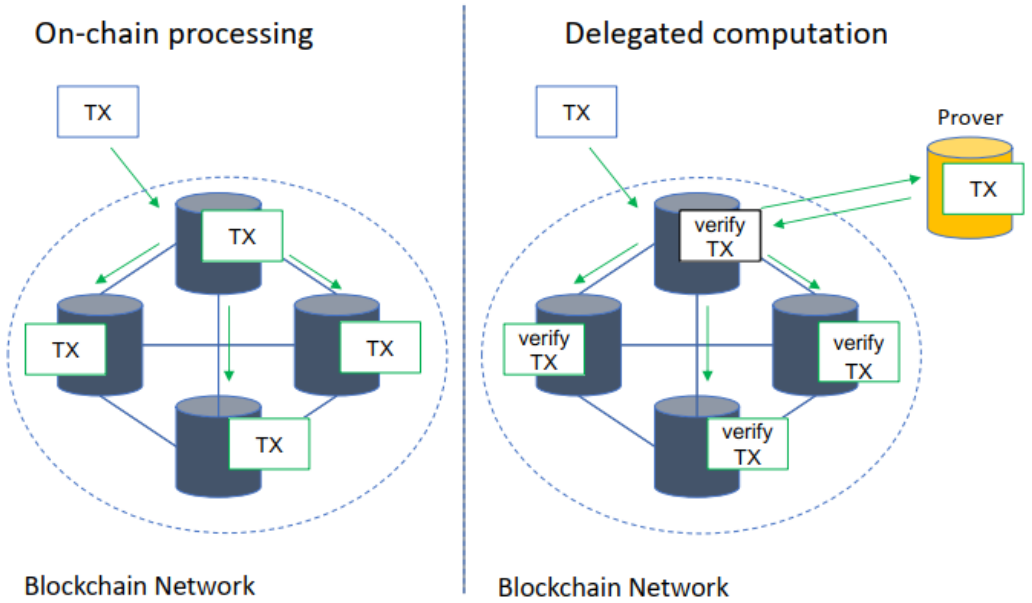
해결 방법

연산과 연산 결과가 올바름을 증명하는 proof를 게시 할 수 있도록
Verifiable computation schemes 를 채택 할 것을 제안

필요한 요구사항

짧은 proof와 저렴한 verification

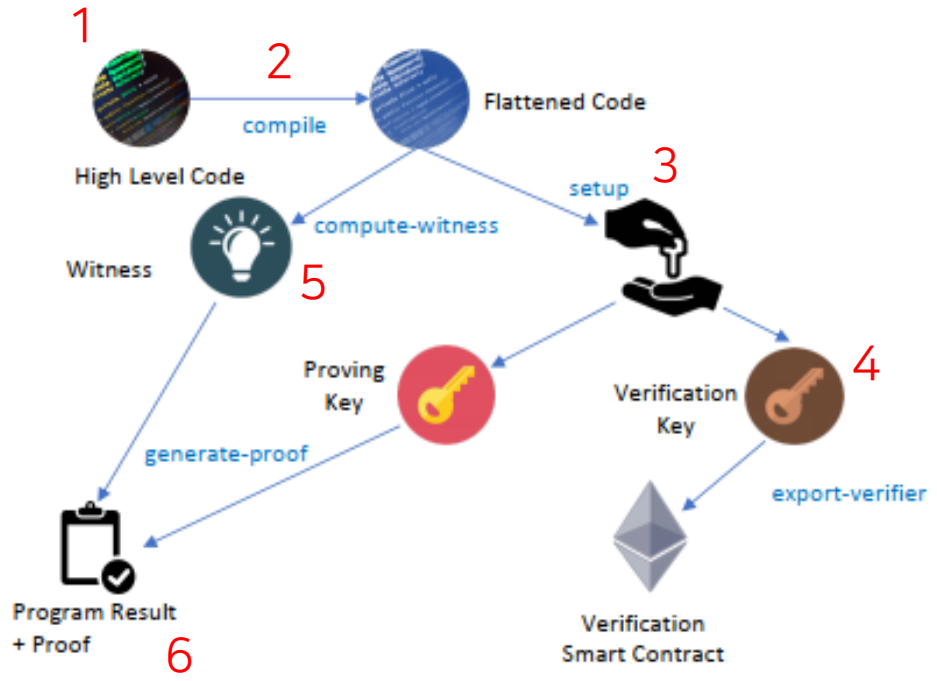
zero- knowledge



Zokrates Implementation

- specifying a provable program 부터 proof 생성 및 블록 체인에 대한 정확성 검증 까지 전체 프로세스를 지원
- 코드는 모두 오픈 소스, GitHub 공개
- proof verification을 위해 Ethereum 블록 체인을 사용

Zokrates Implementation



1. 개발자는 domain specific language (DSL)로 ZoKrates 프로그램을 지정

2. 프로그램은 R1CS로 쉽게 변환 될 수 있도록 flatten 코드로 컴파일
   ➡ zkSNARK proof systems에서 쓰일 수 있음

3. flatten 코드를 기반으로 setup 단계가 수행
   ➡ 긴 proving 키와 짧은 verification 키라는 두 개의 public 키가 생성됨

4. verification 키를 기반으로 verification smart contract이 생성되어 블록 체인에서 proof를 검증 가능

5. proof를 생성하기 위해 prover 는 "compute-witness”단계를 통해 flatten 프로그램을 실행
   ➡ flatten 프로그램에 대한 솔루션을 찾는 것

6. proving 키와 솔루션을 사용하여 proof를 작성하고 이를 verification contract 에 전송하여 정확성을 검증

A. The Zokrates Language

- **zkSNARK을 이용한 Verifiable computation schemes**
  : QAP (Quadratic Arithmetic Programs) 또는 Rank-1-Constraint-Systems (R1CS) 와 같은 수학 방정식을 이용
  ➡ verification schemes을 구축하는 데 적합하지만 복잡한 계산 방식을 지정하는 것은 어렵고 불편

Zokrates

high level domain-specific language를 정의한 다음 R1CS로 변환하여
보다 편리하고 가까운 방식으로 오프 체인 계산을 지정할 수 있음

사용하기 쉽고, provable constraint systems으로 오버헤드가 거의 없이 변환됨

static scoping 기능이 있는 간단한 명령형 언어

다른 circuit 생성 언어 와 호환되며 DSL에 프로그램을 지정할 필요가 없음

1) code structure

- ZoKrates 프로그램의 entry point는 main function
  - ➡ public 및 private input을 argument로 가질 수 있으며 하나 이상의 값을 return
- 프로그램의 올바른 실행을 증명하는 proof가 블록 체인에 전송 될 때 public input은 public 정보가되지만, private input은 공개되지 않으며 prover의 비밀로 유지
- 임의의 함수를 정의하고 호출 가능
- 함수에는 자체 static scope가 있으며 함수 definition가 호출되기 전에 있어야함

2) Types

- ZoKrates의 기본 데이터 type은 prime field element
- This is an positive integer modulo a fixed prime number
- prime number의 크기는 254 bit
  - ➡ 이 크기로 인해 개발자는 대부분의 경우 prime field element를 단순한 부호 없는 정수 유형으로 생각
- binary type을 나타내기 위해 필드 요소가 단순히 값 0과 1로 제한될 수 있음

3) Operators

- 일반적인 산술 연산자가 지원되며 (예 : +,-, *, /) overflow 또는 나머지가 있는 나누기가 없는 한 양의 정수 sementic을 가짐
- 일반적인 비교 연산자가 지원 (예 : ==, <=)
- == 연산자를 사용하여 assertion 을 정의
- Bool 연산자는 정의되어 있지 않지만 AND (a; b) = ab 및 OR (a; b) = 1-(1-a) (1-b)와 같이 함수로 묶인 산술 표현식으로 나타낼 수 있음

4) Control Flow

- For-Loops는 지원되지만 Verifiable computation schemes과 맞추어 줘야 해서 컴파일 프로세스 에서 loop가 statement로 바뀔 때 반복 횟수에 최댓값이 필요
- 같은 이유로 재귀는 지원되지 않음
- If-Else-Statements를 이용해 조건문 사용 가능

B. The ZoKrates Toolbox

ZoKrates DSL에 프로그램이 작성된 후,
올바른 실행을 증명하는 proof가 블록 체인에 전송되고 검증 될 때까지 아래 도구를 거침

지원하는 도구의 종류

1) Compiler
2) Witness Generator
3) Circuit Import
4) Setup and Proof Generation
5) Proof Generation
6) Contract Generator

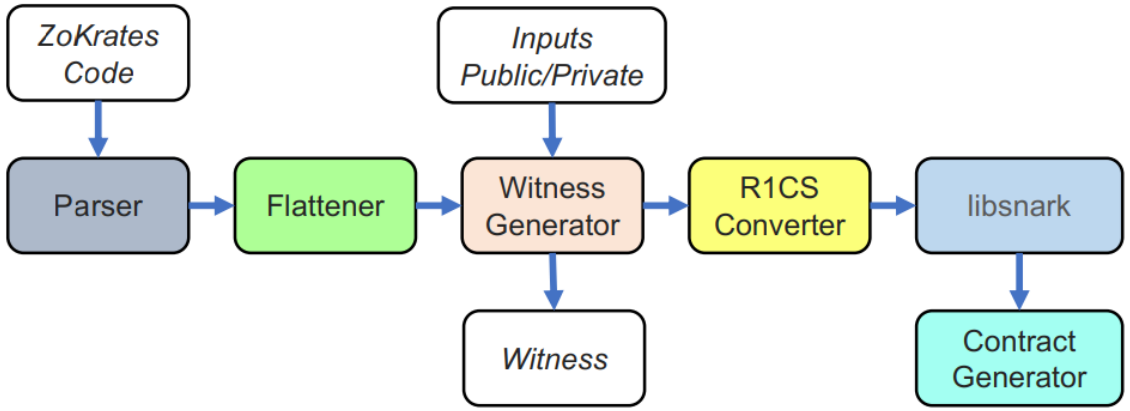


Fig. 3. ZoKrates Architecture.

1) Compiler

parser와 flattener로 구성된 컴파일러는 DSL 코드를 flatten 코드로 변환

flatten 코드는 다음과 같은 형식의 variable definition 및 assertion 목록으로 구성

```
def (c_1*var_1 + c_2*var_2 + ... + c_n*var_n) {=|==}
     (a_1*var_1 + a_2*var_2 + ... + a_n*var_n) * (
    b_1*var_1 + b_2*var_2 + ... + b_n*var_n)
```

Listing 2. Flattened Code Structure

flatten 코드 구조

- verifiable computation schemes이 사용하는 abstractions로 직접적이고 효율적으로 변환됨
- witness 도출 기능을 유지
  - ➡ 입력 이나 이전에 계산된 중간 결과에서 전개 된 코드의 모든 변수를 계산 가능
- 컴파일러는 witness 도출을 위해 witness generator가 특정 변수 값을 계산하도록 임의의 DSL 문을 삽입 가능
- 이런 witness-generation 지시문 앞에는 "#"이 붙고 witness generation 에만 사용
- flattened 코드를 R1CS로 변환 할 때 이 지시문은 무시

2) Witness Generator

프로그램을 실행 해야 실행이 올바르게 수행되었다고 증명해주는 proof를 생성 가능

➡ flatten 프로그램을 만족하는 변수 assignment를 찾는 것을 의미

➡ 변수 assignment를 witness라고 하며 proof 생성 에 사용됨

witness generator

- flatten 코드의 interpreter 역할
- 특정 프로그램에 대한 witness를 찾는데 쓰임
- witness를 찾는 과정에서 프로그램에 대한 private input을 매개변수로 해서, flatten code를 실행하고 모든 변수 값을 저장해서 witness를 찾음

3) Circuit Import

- 특정 계산을 할 때 수동으로 최적화된 circuit을 활용하거나 다른 circuit 생성 도구 와 통합하기 위해 R1CS를 의미적으로 동등한 flatten 코드로 가져올 수 있음

- ZoKrates DSL 코드가 지원되지만 import된 프로그램의 witness 생성은 일반적으로 지원할 수 없으며 사용자가 제공해야함

4) Setup and Proof Generation

이 내용 잘 이해안됨

zkSNARK의 verifiable computation scheme는 일회성 신뢰 setup을 수행해야 함

실행하는 사람은 프로세스에 사용된 private 정보를 모른다는 점에서 이 setup을 믿을 수 있음

private 정보를 알고 있다면 소유자는 위조 증거를 만들 수 있음

그러나 다른 증명의 zero-knowledge 속성은 손상되지 않음

이 문제를 해결하기 위해 섹션 VI에서 이 신뢰를 제거하는 메커니즘에 대해 설명

setup 단계는 프로그램과 public arguments를 입력으로 받아,
proof을 작성하고 검증하는 데 사용할 수 있는 proving 및 verification 키를 생성

이 키를 임의의 횟수로 재사용 가능

Setup 및 Proof Generation 을 위해 libsnark을 사용

5) Proof Generation

- witness가 발견되고 proving 키가 생성 된 후,
  witness의 정확성과 해당 프로그램의 실행 결과를 증명하는 proof가 실행될 수 있음

- 결과 proof는 매우 짧으며 네트워크를 통해 블록 체인에 효율적으로 보낼 수 있음

6) Contract Generator

- verification 키를 기반으로 블록 체인에서 proofs를 확인할 수 있는 Solidity Smart Contract를 생성
- 생성된 계약은 매우 간단한 기본 구조를 가지고 있으며
  on-chain verification 이 활용되는 곳에 따라 customize 가능
- 공식 Solidity 컴파일러 인 solc로 컴파일 한 다음 Ethereum에 배포
- verifyTx 함수는 프로그램의 public 입력 및 결과를 매개 변수로 사용
  → 이전에 생성된 실행 정확성을 증명하는 proof
- 검증 성공 여부와 그에 따른 off-chain 실행의 정확성을 나타내는 boolean 값을 return
- 성공하면 프로그램 결과가 확인되고 그 결과는 on 또는 off 블록 체인의 다음 process에 사용 될 수 있음

Conclusion

- 블록 체인 시스템의 확장성 및 개인 정보 보호 문제를 해결하기 위해
  zero-knowledge verifiable computation scheme 를 기반으로 하는 off-chain 연산 모델을 소개

- ZoKrates
  - off-chain 모델을 지원하기 위한 첫 번째 포괄적인 구현
  - off-chain 연산을 통합하고 배포
  - domain-specific language, 컴파일러, proof생성기, zkSNARK verifiable computation scheme을 위한 verification 스마트 계약으로 구성
  - zero-knowledge proof의 복잡성을 숨기고 개발자에게 보다 친숙하고 높은 수준의 프로그래밍 추상화를 제공

- 블록 체인 시스템에서 off-chain 프로그램 실행에 대한 on-chain 검증을 사용하여 사용자의 privacy를 개선하고 확장성을 높일 수 있음
- 이 패러다임을 지원하는 도구를 제공