

2025 年度 卒業論文

DID に基づいた IoT データ管理システムの構築と評価

2026 年 2 月 10 日

システム工学部システム工学科
(学生番号: 60276128)

竹内 結哉

和歌山大学システム工学部

1 はじめに

近年,IoT 機器の爆発的な増加に伴い,生成されるデータ量は急激に増加している。さらに,IoT は家庭や産業,医療,農業など多様な分野で活用されるようになり,生成されるデータの種類や粒度も一層多様化している。

また,従来の中央集権型による IoT データ管理には主に以下の 3 つの課題が存在する。第一に,スケーラビリティの問題である。IoT デバイスの急増により,そのデータを保存する中央サーバーへの負荷が指数関数的に増大し,処理能力の限界に達する可能性がある。第二に,セキュリティ上の問題である。中央サーバーは単一障害点となりやすく,攻撃対象として脆弱である。第三に,プライバシー保護の問題である。個人情報を含む IoT データが集中することで,情報漏洩時の被害が甚大化するリスクがある。

これらの課題を解決するために,本研究ではユーザ主権型 ID に基づいた分散型データ管理システムの実現を目指す。本システムは,以下の三点を重視して設計されている。

1. データの分散管理:中央集権型管理から脱却し,分散型ファイルシステムである InterPlanetary File System(以下 IPFS)を用いることで,単一障害点を排除しシステムの堅牢性を向上させる。
2. ユーザの真正性確保:分散管理環境におけるなりすまし防止のため,分散型識別子である Decentralized Identity(以下 DID)を活用し,データ所有者の身元を保証する。
3. データの信頼性と改ざん防止:ブロックチェーンを活用し,データが改ざんされていないことを検証可能とする。

以上の要素を組み合わせることで,IoT データに対する分散型かつ信頼可能な管理基盤を構築することを目指す。

2 関連研究

IoT データ管理におけるプライバシー確保は、従来より大きな研究課題とされている。現行の IoT システムは、多くが中央集権型のクライアントサーバーモデルに依存しており、生成される膨大なデータはサービスプロバイダを介して管理される。このような中央集権型モデルは、ユーザの行動履歴や個人情報が第三者に漏洩・不正利用されるリスクを内包している。この問題に対処するため、近年ではブロックチェーンを基盤とした分散型データ管理アーキテクチャの研究が進められている。

IoT とブロックチェーンの統合に関する典型的なユースケースとしては、(1) イベントの改ざん防止ログ、(2) アクセス制御の管理、(3) IoT センサーデータの購入などが挙げられる [1]。これらの研究では、ブロックチェーンが持つ分散性と改ざん耐性を活用し、IoT 環境におけるデータ完全性の確保を目指している。一方で、既存の研究の多くは概念設計やプロトコル提案に留まり、Proof-of-Concept レベルの実装や性能評価が十分に行われていないことが課題とされている。

Ali ら [2] は、ブロックチェーンと IPFS を組み合わせたモジュラーコンソーシアムアーキテクチャを提案している。このモデルでは、IoT デバイスをプライベートな「サイドチェーン」にグループ化し、アクセス制御の管理を「コンソーシアムブロックチェーン」によって実現する。サイドチェーンはセンサーデータ生成イベントを記録し、コンソーシアムブロックチェーンはアクセス要求の不变なログを保持することで、プライバシー保護とアカウンタビリティを両立させている。さらに、データ自体は IPFS 上に保存され、ブロックチェーンはハッシュのみを記録することで、ストレージ効率とセキュリティの両立を実現している。

評価実験として、Ethereum(PoW) および Monax(PoS/Tendermint) を用いた性能比較が行われている。その結果、Monax はサイドチェーンレベルで低い処理オーバーヘッドを示す一方で、コンソーシアムレベルでは高いネットワークトラフィックオーバーヘッドが課題となった。Ethereum はコンソーシアムレベルで通信効率に優れるものの、PoW に基づく高い計算コストが問題点として指摘されている。このように、ブロックチェーンのコンセンサスメカニズムの選択は、IoT 分散アーキテクチャの実用性に直接影響を与えることが明らかとなっている。

また、[1] では、IoT センサーから得られるデータを二重チャネル (**Dual Channel**) で配信するミドルウェアが提案されている。一方は Ethereum と IPFS を用いたインテグリティチャネルで、データ完全性を保証する。もう一方は MQTT を利用したリアルタイムチャネルで、低遅延かつ高速な配信を実現する。この方式は、後からインテグリティチャネルを参照することで、リアルタイムチャネル経由で受け取ったデータの改ざん検出が可能になる点に特徴がある。ただし、Raspberry Pi を用いた評価では、インテグリティチャネルにおいて数百秒規模の遅延やデータ欠損が発生するなど、ブロックチェーンのオーバーヘッドとリソース制約の影響が確認されており、実運用に向けた課題も示されている。

本研究は、これらの先行研究の知見を基盤としつつ、IoT データ管理における DID と VC の統合に焦点を当てる。既存研究が主に公開鍵基盤に依存したアクセス制御を行っていたのに対し、本研究では DID/VC を導入することで、より柔軟かつ標準化された認証・検証モデルを提供する点に新規性がある。また、Ethereum および IPFS を用いたローカル環境での実装と性能測定を通じて、スケーラビリティと実用性の両面から評価を行うことを目的としている。

3 準備

本研究では、分散型データ管理の基盤技術として IPFS,DID、およびブロックチェーンを用いる。本章では、これらの技術の概要を説明し、さらに本研究で使用した実験環境について述べる。

3.1 IPFS

IPFS は、ファイルを单一サーバに保存する従来の方式とは異なり、世界中のノードに分散的に保存するピアツーピア型のファイルシステムである。特徴は「コンテンツアドレス方式」である点で、保存されたファイルはその内容を基に計算される Content Identifier(以下 CID) によって参照される。CID はファイル内容のハッシュ値であるため、以下の性質を持つ。

- 同一内容のファイルは必ず同じ CID となる。
- 1 ビットでも内容が変更されれば別の CID となる。
- CID から元のデータを推測することはできない。

この仕組みにより、ファイルが改ざんされていないかを CID の比較によって確認できる。

本研究では、ユーザが保有する IoT データを IPFS に保存し、得られた CID をブロックチェーンに記録することで、データの真正性と参照可能性を確保している。

3.2 DID

DID は、特定の中央管理者に依存せずに個人が自分自身で生成・管理できる識別子であり、分散型デジタルアイデンティティの基盤となる技術である。DID は単なる文字列であるが、この DID に関する公開鍵や認証方法等をまとめた文書を DID Document と呼び、識別子の正当性確認に用いる。DID Document はブロックチェーンなどの改ざん耐性を持つ基盤に保存されることで、第三者がその内容を検証可能となる。

本研究では、ユーザ A が発行した DID と DID Document をブロックチェーンに登録し、IoT データの所有者であることを証明するための基礎情報として利用する。

さらに本研究のシステムでは、企業がユーザに対して Verifiable Credential(以下 VC) を発行し、IoT データが正当なデバイスによって生成されたものであることを保証する仕組みを構築する。VC の検証時には、DID Document に記録された公開鍵により署名を確認し、データの真正性を確認することができる。

3.3 ブロックチェーン

ブロックチェーンは、ネットワーク上の複数のノードが同一のデータを共有し、合意形成に基づいて取引履歴を記録する分散型台帳である。記録されるデータは複数の取引をまとめた「ブロック」に格納され、各ブロックは直前のブロックのハッシュ値を保持することで鎖状に連結される。この構造により、一部のブロックが改ざんされると以降すべてのブロックの整合性が崩れるため、改ざんは即座に検知される。

特に重要なのは、ハッシュ値の性質である。ハッシュ値はデータから一方向的に算出される識別子であり、内容にわずかな変更があっても全く別の値となる。また、ハッシュ値から元のデータを復元することはできない。ブロックチェーンではこの性質を利用し、データの完全性を保証している。

本研究では、IoT データの要約情報 (IPFS の CID) および DID Document をスマートコントラクト経由でブロックチェーンへ記録することで、データ登録の証跡を改ざん不能に保持できるようにしている。

さらに、既存研究においても議論されているように、Proof-of-Work(以下 PoW) はエネルギー消費が大きく、リソース制約のある IoT 環境には適さないことが指摘されている [1]。そのため、本研究においても PoW ベースのブロックチェーンは採用せず、より実装や評価に適した Ethereum 環境を主に使用することとした。

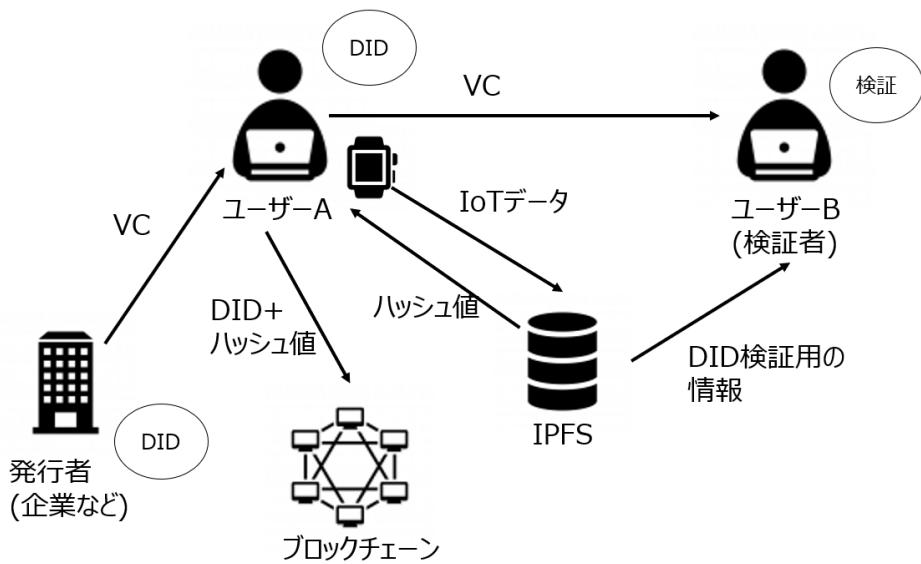


図 1 提案システムの概要図

4 システム構成

本研究で提案するシステムは, IoT データを分散的に管理するために,DID,IPFS, およびブロックチェーンを連携させたものである。本章では, まずシステム全体の流れを示した後, 各要素の役割について説明する。

4.1 システムの概要

本研究で提案するシステムの全体像を図 1 に示す。1 に示すように, ユーザ A は自身の IoT データを IPFS に格納し, その結果として得られるハッシュ値(以下 CID)を, 自身の識別子である DID とともにブロックチェーンに記録する。その後, 発行者が IoT データの真正性を保証する Verifiable Credential(以下 VC)を発行し, 検証者であるユーザ B がブロックチェーン上の DID 情報と VC を突き合わせることで, ユーザ A の正当性を検証する。

4.1.1 データ所有者(ユーザ A)

ユーザ A は, 自身の識別子として DID を保持し, その検証用情報(公開鍵など)をブロックチェーンに格納する。さらに, 保持している IoT データを IPFS に格納し, IPFS から返される CID を取得する。この CID はデータの一意なハッシュ値であり, データ改ざん検知に利用できる。ユーザ A は, CID と自身の DID を組み合わせてブロックチェーンに登録することで, データの所有者であることを保証する。

4.1.2 発行者(企業など)

発行者とは, ユーザ A に対して VC を発行する主体である。本研究ではユーザ A が所持している IoT 機器の製造元企業などを想定している。発行者はユーザ A が保持している IoT データが自社製品によって生成されたデータであることを確認し, その真正性を保証する VC をユーザ A に発行する。

4.1.3 検証者(ユーザ C)

検証者は, ユーザ A と IoT データを取引する相手, すなわちデータの受領者を想定している。検証者は, ユーザ A から提示された VC を受け取り, ブロックチェーン上の DID 情報と照合することで, ユーザ A が真正なデータ所有者であることや, IoT データについて企業が保証していることについて確認する。

5 システム全体のフロー

本研究で構築したシステムは, IoT データを提供するユーザ A, データの真正性を確認する企業(発行者), および最終的に VC を検証する第三者(検証者)により構成される。システムの処理は, 登録フェーズと検証フェーズの 2 つに大別される。

登録フェーズでは DID · DID Document · IoT データがブロックチェーンおよび IPFS に記録され, 企業による VC 発行までが行われる。一方, 検証フェーズでは, 提示された VC の署名検証を通じてユーザ A が真正なデータ提供者であることを確認し, 安全なデータ取引を可能にする。

以下では, 両フェーズの詳細な処理について説明する。

5.1 登録フェーズ

登録フェーズの全体像を図 2 に示す。本フェーズは,DID の生成 · 登録,IoT データの保存,CID の登録, および企業による VC 発行, ユーザ A による VC への署名までの流れで構成される。

5.1.1 DID の生成と DID Document の登録

まず, ユーザ A および企業はそれぞれ DID を生成し, 公開鍵などの識別情報を含む DID Document を作成する。作成した aDID Document はスマートコントラクト(registerDIDDocument)を通じてブロックチェーンへ登録される。これにより, 各主体の公開鍵が台帳上に保持され, 後続処理における署名検証の基盤が整備される。

5.1.2 IoT データの保存と CID の取得

次に, ユーザ A は自身が保有する IoT データを IPFS に保存する。保存されたデータに対し, IPFS は一意の CID(Content Identifier) を返却する。

5.1.3 CID と DID のブロックチェーンへの記録

ユーザ A は取得した CID と自身の DID をスマートコントラクト(registerDIDDocument)を用いてブロックチェーンへ登録する。これにより, 「どの DID がどの IoT データの所有者であるか」が改ざん耐性を持って記録され, 第三者は所有者を検証可能となる。

5.1.4 企業によるデータ真正性の確認と VC 発行

企業は, ブロックチェーン上の DID と CID の整合性を確認し, ユーザ A が登録したデータが真正であるかを検証する。正当性が確認された場合, 企業はユーザ A 向けに VC を発行する。VC には企業の DID による署名が付与され, 内容の真正性が保証される。

5.1.5 ユーザ A による VC への追加署名

最後に, ユーザ A は自身の DID に紐づく秘密鍵を用いて VC に追加署名を行う。これにより, 企業とユーザ A の双方が署名した VC が完成し, 検証フェーズにおいて提示・検証可能な証明情報となる。

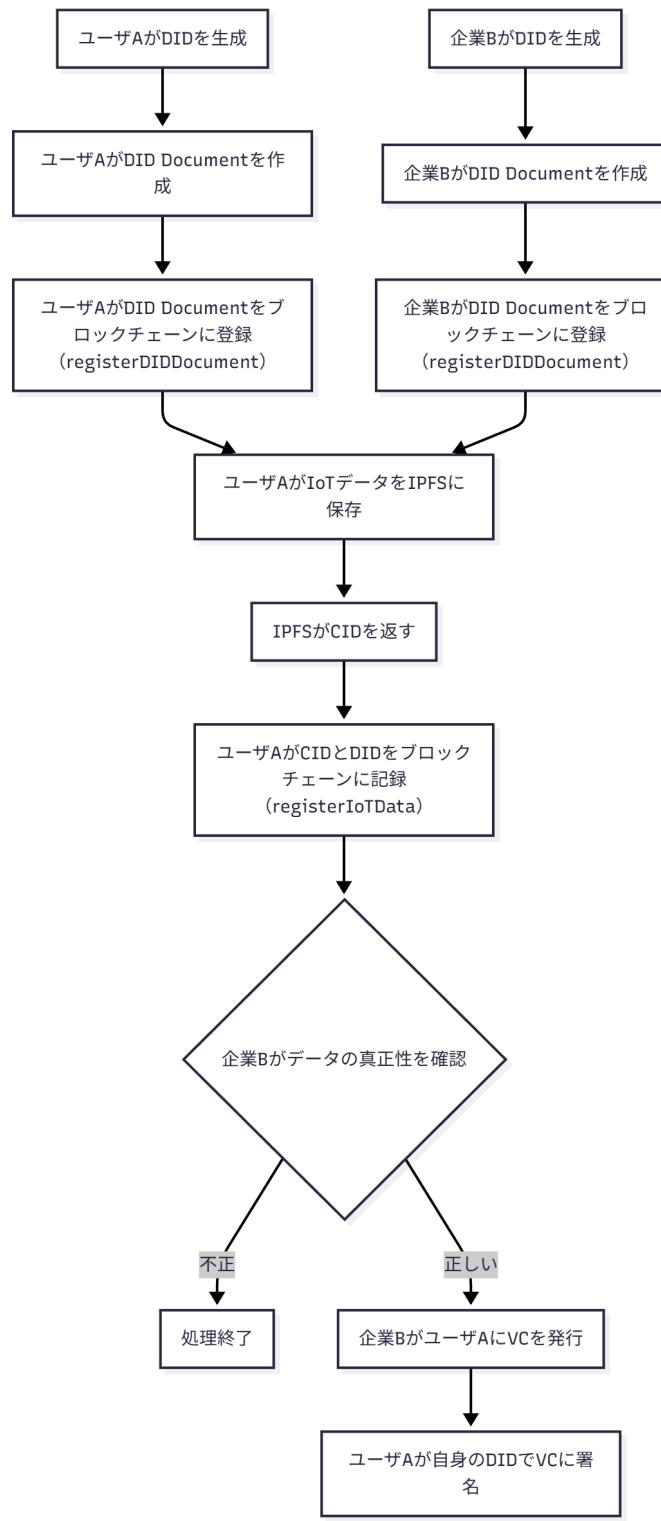


図2 登録フェーズのフローチャート

5.2 検証フェーズ

検証フェーズの処理全体を図3に示す。本フェーズでは、ユーザAが提示したVCに含まれる署名を順に検証し、データ提供者の正当性を確認する。

5.2.1 VCの提示と受領

ユーザAは完成したVCを検証者へ提示する。検証者はVCを受け取り、内容に含まれる署名情報とDID情報を確認する。

5.2.2 企業の署名検証

検証者はまずVCに含まれる企業の署名を検証する。署名の公開鍵は、ブロックチェーンへ登録された企業のDID Documentから取得される。署名が不一致であった場合、VCは不正と判断され処理を終了する。

5.2.3 ユーザAの署名検証

企業の署名が正当であった場合、次にユーザAの署名が検証される。ユーザAの公開鍵は同様にDID Documentから取得でき、署名が一致する場合、ユーザAがIoTデータの正当な保有者であることが確認される。不一致の場合、処理は終了する。

5.2.4 データの取引の実行

企業およびユーザAの署名がいずれも正当であれば、検証者はユーザAが真正なデータ提供者であると判断できる。この確認を基に、検証者はユーザAと安全にデータ取引を実行する。

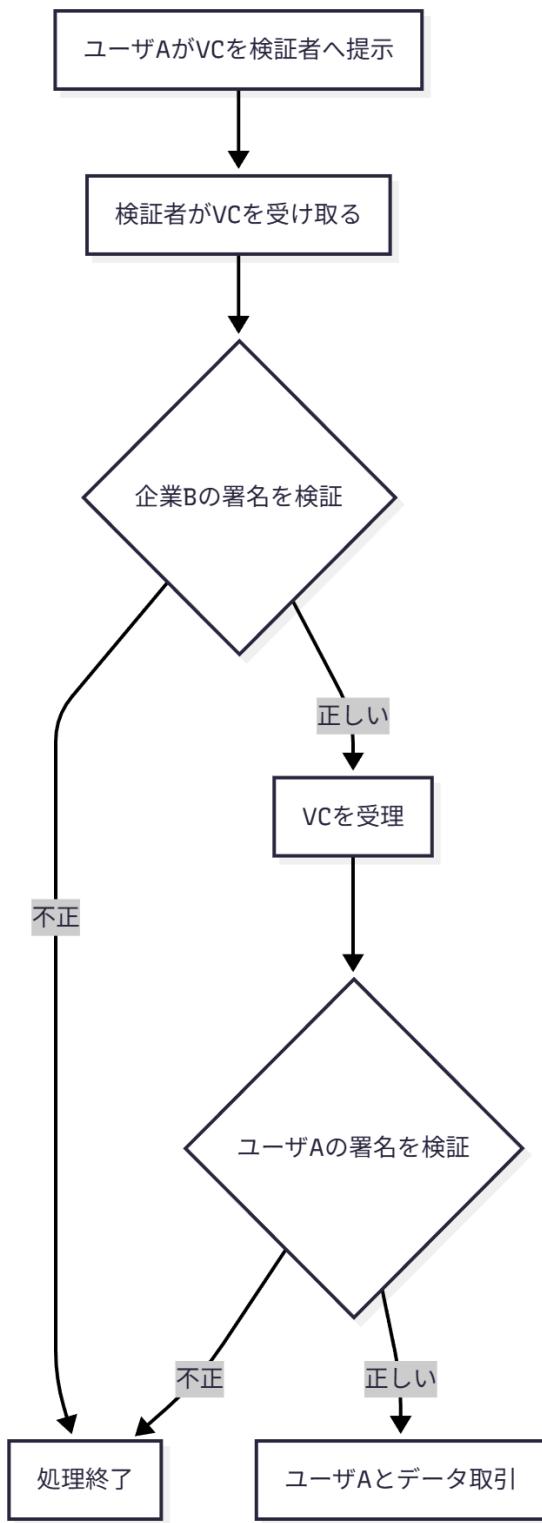


図3 検証フェーズのフローチャート

5.3 スマートコントラクトによる登録処理

本研究で使用したスマートコントラクトでは、ユーザの DID Document および IoT データ (CID) をブロックチェーンに記録するために `registerDIDDocument` および `registerIoTData` の 2 つの関数を提供している。それぞれの処理内容を擬似コードとして以下に示す。

Algorithm 1 DID Document の登録処理 (`registerDIDDocument`)

Require: DID, DID Document(JSON 形式)

- 1: 呼び出し元アドレスを取得する (これをユーザ識別子として扱う)
 - 2: DID Document を以下の形式で保存する:
 - 3: `records[呼び出し元アドレス].append((DID, DID_Document))`
 - 4: DID 登録イベントを発行する
-

Algorithm 2 IoT データ (CID) の登録処理 (`registerIoTData`)

Require: DID, CID(IPFS で取得したハッシュ値)

- 1: 呼び出し元アドレスを取得する
 - 2: IoT データを以下の形式で保存する:
 - 3: `iotData[呼び出し元アドレス].append((DID, CID))`
 - 4: IoT データ登録イベントを発行する
-

6 実験と考察

本章では、本研究で構築した DID・VC・IPFS・Ethereum を用いた分散型データ管理システムについて、機能動作試験および性能評価を通してその有効性を検証する。

6.1 実験目的

本研究の実験目的は、提案システムが実社会の運用に耐えうる性能と有効性を備えているかを検証することである。まず、IoT データの記録から VC による検証までの一連の処理を再現し、DID・VC・IPFS・ブロックチェーンを統合したシステムとして正しく動作することを確認する。また、分散ストレージとして利用する IPFS に対して、ファイルアップロード処理の処理時間・スループット・エラー率を測定し、膨大なデータ量を扱う IoT 環境において実用的に運用可能なかを評価する。さらに、DID および VC を用いたユーザ検証処理、およびブロックチェーンへのトランザクション記録に要する処理時間を測定し、提案システム全体の性能を定量的に評価する。

6.2 実験環境

実験は以下の環境で行った。

- OS: Windows 11 Home
- CPU: AMD Ryzen 5 PRO 7530U with Radeon Graphics(2.00Hz)
- メモリ: 16GB
- IPFS: go-ipfs v0.35.0
- ブロックチェーン環境: Ganache v7.9.2
- Solidity: v0.5.16
- Node.js: v18.20.7
- Truffle: v5.11.5
- Web3.js: v1.10.0

6.3 実験方法

本節では、本研究で構築したシステムに対して実施した実験方法を述べる。実験は大きく次の 2 段階に分けて行った。

1. 機能動作試験 DID Document の登録、IoT データの IPFS への保存、CID のブロックチェーンへの保存、発行者による VC 発行、検証者による VC 検証という一連の処理が正しく実行されることを確認した。
2. 性能評価システム内の主要な処理について処理時間を計測し、応答時間を評価した。測定対象は以下のとおりである。
 - IoT データの IPFS アップロード時間
 - ブロックチェーンへの CID 登録時間
 - VC 発行処理時間
 - VC 検証処理時間

6.4 実験結果

6.4.1 機能動作試験の結果

本研究で構築したシステムが想定した一連の処理を正しく実行できるかを確認した。その結果、以下のすべての処理が問題なく動作した。

- DID の生成および DID Document のブロックチェーンへの登録 (図 4)
- IoT データの IPFS への保存および CID の取得 (図 5)
- 取得した CID のブロックチェーンへの保存 (図 6)

- ・発行者による VC の発行 (図 7)
- ・ユーザ A による VC への署名 (図 8)
- ・検証者による VC の署名検証 (図 9)

```
=====
■ Step1: DID ドキュメント生成 & 登録
=====

[1] DID Document を作成しました。

  └ UserA DID: did:example:userA
  └ Company DID: did:example:company
[2] UserA の DID をブロックチェーンへ登録中...
  → UserA の DID を登録しました。

[3] Company の DID をブロックチェーンへ登録中...
  → Company の DID を登録しました。

=====
└ DID ドキュメント登録 完了
=====
```

図 4 DID および DID Document の生成・登録処理の実行結果

```
=====
■ Step2: IoTデータを IPFSへアップロード
=====

[1] ローカル IPFS ノードへ接続しています ...
  → 接続成功

[2] IoTデータファイルを読み込みました
  対象ファイル : demo/data/iot-data.json

[3] IPFS へデータをアップロード中 ...

[4] アップロード完了 !
  → 取得した IPFS CID: QmRh3fCVx3AuedwpND6TRKpZKV09TdbtK8cjNDxP9d7TS3

=====
└ IPFS アップロード処理 完了
=====
```

図 5 IPFS へのデータアップロードの実行結果

以上より、本研究で提案するデータとその所有者の正当性を保証するフローが一貫して成立することを確認した。

6.4.2 性能評価の結果

本研究で構築したシステムについて、各処理に要する時間およびスループットを測定し、性能評価を行った。測定はすべて、各処理を 20 回繰り返した際の平均値を算出した。

まず、IoT データの IPFS へのアップロード性能を評価した。データ数 10 件 (931bytes) の場合、アップロードに要する平均時間は 19.11ms、平均スループットは 0.054MB/s であった。同様に、データ数 100 件 (9 279bytes) では平均時間 20.78ms、平均スループット 0.720MB/s、データ数 1 000 件 (96 793bytes) では平均時間 21.20ms、平均スループット 7.344MB/s を記録した。

次に、ブロックチェーン関連および VC 処理の性能評価を行った。ブロックチェーンへの登録処理では、データ内容に依存しない条件下で、平均処理時間は 63.30ms であった。また、VC の発行処理に要する平均時間は 10.45ms、VC の検証

```

=====
■ Step3: IoTデータ(CID)をブロックチェーンへ登録
=====

[1] UserA の Ethereum アドレス : 0x2c854F81C990fDD856fC360f17Dc592366711f08
[2] IPFS から取得した CID:
  → QmRh3fCVx3AuedwpND6TRKpZKVo9TdbtK8cjNDxP9d7TS3
[3] UserA の DID:
  → did:example:userA
[4] ブロックチェーンへ登録処理を送信中...
[5] 登録完了！
  → IoTデータ (DID, CID) をブロックチェーンに保存しました。

=====
■ Step3 完了: IoT データ登録成功
=====
```

図 6 CID および DID のブロックチェーンへの登録処理

```

=====
■ Step4: 企業が IoT データの真正性を保証する VC を発行
=====

[1] Company の Ethereum アドレス :
  → 0x041653bCaB0e61d24236212DdcECc8F9b9E4745A
[2] VC 生成に使用する情報:
  CID      → QmRh3fCVx3AuedwpND6TRKpZKVo9TdbtK8cjNDxP9d7TS3
  User DID → did:example:userA
  Company DID → did:example:company
[3] VC オブジェクトを生成中...
[4] 発行者が秘密鍵による VC署名処理を実行中...
[5] VC の発行が完了しました！

=====
Step4 完了: VC 発行処理が正常に終了しました
=====
```

図 7 発行者が VC を発行する処理

処理に要する平均時間は 155.782ms であった。

以上の結果を表 1 にまとめる。

6.5 考察

7 まとめ

```

=====
■ Step5: UserA による VC 署名
=====

[1] UserA の Ethereum アドレス :
    → 0x2c854F81C990fDD856fC360f17Dc592366711f08

[2] 企業が発行した VC を読み込み中...

    読み込んだ VC の概要:
    Issuer DID → did:example:company
    Subject DID → did:example:userA
    CID          → QmRh3fCVx3AuedwpND6TRKpZKVo9TdbtK8cjNDxP9d7TS3

[3] UserAによるVC署名処理を実行中...

[4] UserA による 署名が完了しました。
    以下が UserA の 署名情報 です :

===== 🔍 UserA の 署名情報 =====
{
    "type": "EcdsaSecp256k1",
    "created": "2025-12-12T07:49:43.109Z",
    "verificationMethod": "did:example:userA#key-1",
    "hash": "0x9911a002516a2b7e7009192b89c07131fdc5561d3c4fee8677f2929d07d61268",
    "signature": "0x73ff394e52afac70b0f57c99c019bdc9ebf05039175574313a3aaafb8fa895e770c1b2ec394fb710fc352
3f420b3ec9f0e00909b3eeb3b6e695af447bf730d3431c"
}
=====

=====
Step5 完了: UserA による VC 署名処理が正常に終了しました
=====
```

図 8 UserA が VC に署名する処理

表 1 各処理における性能評価結果

処理内容	条件	平均値
IPFS アップロード	10 件 (931bytes)	19.11ms
IPFS アップロード	100 件 (9 279bytes)	20.78ms
IPFS アップロード	1 000 件 (96 793bytes)	21.20ms
IPFS スループット	10 件	0.054MB/s
IPFS スループット	100 件	0.720MB/s
IPFS スループット	1 000 件	7.344MB/s
ブロックチェーン登録	—	63.60ms
VC 発行	—	10.45ms
VC 検証	—	155.782ms

```

=====
Step6: Verifiable Credential(VC)の検証
=====

[1] 検証対象の VC:
{
  "id": "vc:device-auth:userA",
  "issuer": "did:example:company",
  "subject": "did:example:userA",
  "claim": {
    "cid": "QmRh3fCVx3AuedwpND6TRKpZKV09TdbtK8cjNDxP9d7TS3",
    "verifiedByDevice": "company-original"
  },
  "proof": {
    "type": "EcdsaSecp256k1",
    "created": "2025-12-12T06:56:57.139Z",
    "verificationMethod": "did:example:company#key-1",
    "hash": "0x01d28843637f345e1dc64a46a2fb298a5113d2114923dc04e9e690ca595a6709",
    "signature": "0x1ae8637130c24991e4d86938fbe18c18f091a0b89db56af1ecd82c22a6fd3920a9a86358e571a7471
52fadd767835bd80d2cecf4b782c366cfb30837a7ff8ddad1c"
  },
  "userProof": {
    "type": "EcdsaSecp256k1",
    "created": "2025-12-12T07:49:43.109Z",
    "verificationMethod": "did:example:userA#key-1",
    "hash": "0x9911a002516a2b7e7009192b89c07131fdc5561d3c4fee8677f2929d07d61268",
    "signature": "0x73ff394e52afac70b0f57c99c019bdc9ebf05039175574313a3aaaf8b8a895e770c1b2ec394fb710fc3
523f420b3ec9f0e00909b3eeb3b6e695af447bf730d3431c"
  }
}

[2] Issuer の DID Document を検索...
▶ 所有者アドレス : 0x041653bCaB0e61d24236212DdcECc8F9b9E4745A
▶ DID Document: {
  '0': 'did:example:company',
  '1': {'"id": "did:example:company", "controller": "0x041653bCaB0e61d24236212DdcECc8F9b9E4745A"}',
  __length__: 2,
  did: 'did:example:company',
  doc: {'"id": "did:example:company", "controller": "0x041653bCaB0e61d24236212DdcECc8F9b9E4745A"}'
}

[3] Subject(UserA) の DID Document を検索...
▶ 所有者アドレス : 0x2c854F81C990fDD856fC360f17Dc592366711f08
▶ DID Document: {
  '0': 'did:example:userA',
  '1': {'"id": "did:example:userA", "controller": "0x2c854F81C990fDD856fC360f17Dc592366711f08"}',
  __length__: 2,
  did: 'did:example:userA',
  doc: {'"id": "did:example:userA", "controller": "0x2c854F81C990fDD856fC360f17Dc592366711f08"}'
}

[4] IoTデータの記録を検索...
▶ DID: did:example:userA
▶ CID: QmRh3fCVx3AuedwpND6TRKpZKV09TdbtK8cjNDxP9d7TS3

[5] Issuer の署名を検証中...
▶ recover結果: 0x041653bCaB0e61d24236212DdcECc8F9b9E4745A
▶ 登録Issuerアドレス : 0x041653bCaB0e61d24236212DdcECc8F9b9E4745A
 Issuer の署名は正しい

[6] UserA の署名を検証中...
▶ recover結果: 0x2c854F81C990fDD856fC360f17Dc592366711f08
▶ UserAアドレス 0x2c854F81C990fDD856fC360f17Dc592366711f08
 UserA の署名は正しい

=====
Step6 完了: VC検証処理が正常に終了しました
=====
```

図 9 検証者が VC を検証する処理

参 考 文 献

- [1] Simon Krejci, Marten Sigwart, and Stefan Schulte. Blockchain- and IPFS-based data distribution for the internet of things. In Antonio Brogi, Wolf Zimmermann, and Kyriakos Kritikos, editors, *Service-Oriented and Cloud Computing*, pp. 177–191, Cham, 2020. Springer International Publishing.
- [2] Muhammad Salek Ali, Koustabh Dolui, and Fabio Antonelli. IoT data privacy via blockchains and IPFS. In *Proceedings of the Seventh International Conference on the Internet of Things*, IoT ’17, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.