

卒業論文 2025 年度(令和 7 年)

コネクティッドカーにおける運転データの管理・提示システムの構築

慶應義塾大学大学 環境情報学部
仁戸田晃

コネクティッドカーにおける運転データの管理・提示システムの構築

コネクティッドカーの普及に伴い、テレマティクスを通じて運転データが抽出・収集され、利用ベース保険やカーシェアリングなど、さまざまなサービスで活用されている。しかし、既存のシステムでは、運転データは自動車メーカー・サービス事業者の提供する閉じたインフラ内で保存・管理されるのが一般的であり、その結果、データのサイロ化やベンダーロックインが生じ、利用者が自身の自動車から抽出したデータにアクセスあるいはコントロールできないという課題がある。一方で、サービス事業者にとって、運転データの真正性が担保されることは依然として重要である。

そこで本研究では、自動車とサービス事業者の間に利用者を論理的に位置付ける、新たなコネクティッドカー向けの新たな運転データの管理・提示モデルを提案する。提案モデルでは、暗号学的な技術を用いることでデータの真正性を担保しつつ、利用者が自身の運転データへアクセスおよびコントロールできることを可能にする。このモデルを実現するために、Verifiable Credentials および Decentralized Identifiers に基づくシステムを設計し、運転データを複数の主体間で発行、保持、検証できる仕組みを構築した。

さらに、概念実証を行うために提案手法に基づいたシステムを実装した。実装した後には、本システムについて、データに対するアクセスおよびコントロール可能性、データの真正性の担保の観点から定性的評価を行うとともに、概念実証から検証できる実現可能性についても評価し、最後に STRIDE に基づく脅威分析を実施した。その結果、提案手法は、データに対するアクセスおよびコントロール可能性とデータの真正性の担保を両立した上で実現可能性があることを示した。

本研究の貢献により、特定のベンダーに依存しない開かれた自動車データエコシステムが構築可能になることが期待できる。

キーワード:

1. コネクティッドカー, 2. Verifiable Credentials

慶應義塾大学大学 環境情報学部
仁戸田晃

Abstract of Bachelor's Thesis - Academic Year 2025

Building a System for Managing and Presenting Driving History Data in Connected Cars

With the proliferation of connected cars, driving data extracted through telematics is increasingly utilized across various services, such as usage-based insurance and car-sharing. However, in conventional systems, this data is typically stored within closed infrastructures managed by automakers or service providers. This centralized approach leads to data silos and vendor lock-in, preventing users from accessing or controlling the data generated by their own vehicles. Meanwhile, maintaining the authenticity of driving data remains a critical requirement for service providers.

To address these challenges, this research proposes a novel management and presentation model for connected car data that logically positions the user between the vehicle and the service provider. By leveraging cryptographic techniques, the proposed model ensures data authenticity while empowering users with full access and control over their driving data. To implement this model, we designed a system based on Verifiable Credentials (VCs) and Decentralized Identifiers (DIDs), establishing a framework where driving data can be issued, held, and verified across multiple stakeholders.

We implemented a prototype based on the proposed architecture for a proof-of-concept. The system was evaluated qualitatively in terms of data accessibility, controllability, and authenticity. Furthermore, we assessed its technical feasibility and conducted a comprehensive threat analysis using the STRIDE methodology. The results demonstrate that the proposed method is feasible and successfully reconciles user-centric data control with rigorous data authenticity. This research contributes to the potential realization of an open automotive data ecosystem that is independent of specific vendor infrastructures.

Keywords :

1. Connected Car, 2. Verifiable Credentials

Keio University Faculty of Environment and Information Studies
Akira Nieda

目 次

第1章 序論	1
1.1 はじめに	1
1.2 本論文の構成	2
第2章 背景	3
2.1 自動車の情報化	3
2.2 コネクティッドカーとテレマティクス	3
2.2.1 コネクティッドカーとテレマティクスの概要	3
2.2.2 テレマティクスの活用事例	4
2.2.3 コネクティッドカーの発展と展望	4
2.3 車両データを用いるサービス	4
2.3.1 利用ベース保険	4
2.3.2 カーシェアリングサービス	5
2.4 本章のまとめ	5
第3章 基盤技術	6
3.1 デジタル証明書と構成技術	6
3.1.1 デジタル証明書	6
3.1.2 暗号学的ハッシュ関数	7
3.1.3 公開鍵暗号	7
3.1.4 デジタル署名	7
3.2 Verifiable Credentials と Decentralized Identifiers	8
3.2.1 Verifiable Credentials	8
3.2.2 Decentralized Identifiers	9
3.2.3 選択的開示	11
3.2.4 ウォレットアプリケーション	11
3.3 本章のまとめ	11
第4章 本研究における問題定義	12
4.1 既存システムにおけるデータの流れ	12
4.2 既存システムの問題点	12
4.2.1 データのサイロ化	13
4.2.2 データに対するアクセス及びコントロールの欠如	13

4.2.3 データの真正性の担保	13
4.2.4 各事業者のポリシーの相違	14
4.3 本章のまとめ	14
第5章 提案手法	15
5.1 システムの満たすべき要件	15
5.1.1 データに対するアクセスおよびコントロール可能性	15
5.1.2 データの真正性の担保	15
5.2 前提条件	15
5.3 提案手法の概要	16
5.4 全体構造	17
5.4.1 システムアーキテクチャ	17
5.4.2 データおよび処理の流れ	18
5.4.3 処理アプリケーション	20
5.4.4 連携アプリケーション	20
5.4.5 ウォレットアプリケーション	20
5.4.6 検証者アプリケーション	20
5.5 データモデル	20
5.5.1 基本設計	21
5.5.2 データの構造	21
5.6 本章のまとめ	22
第6章 実装	23
6.1 概念実証の範囲	23
6.2 実装の概要	23
6.2.1 技術スタック	23
6.2.2 データモデル	24
6.2.3 自動車アプリケーション	25
6.2.4 モバイルアプリケーション	25
6.2.5 検証者アプリケーション	26
6.3 本章のまとめ	26
第7章 評価	27
7.1 評価内容	27
7.2 システムの定性評価	27
7.2.1 データに対するアクセスおよびコントロール可能性	27
7.2.2 データの真正性の担保	27
7.3 概念実証の評価	28
7.3.1 システムの実現可能性	28
7.4 STRIDEによる脅威分析	28
7.4.1 STRIDEについて	28

7.4.2	システムの DFD	29
7.4.3	特定された脅威と対処	30
7.4.4	自動車における脅威	30
7.4.5	モバイルにおける脅威	30
7.4.6	検証者における脅威	31
7.5	本章のまとめ	31
第 8 章	結論	32
8.1	本研究のまとめ	32
8.2	本研究の課題と限界	32
謝辞		34
付 錄 A 付録		35
A.1	実装のコードスニペット	35
A.2	STRIDE による脅威分析の結果	36

図 目 次

3.1	VCsにおけるIHVモデルと仕組み	9
3.2	DIDsの例	10
3.3	DIDsのエコシステム	10
4.1	既存システムにおけるデータの流れ	12
5.1	提案するシステムの論理アーキテクチャ	17
5.2	提案するシステムのシーケンス図	19
6.1	概念実証の範囲	24
7.1	提案するシステムのデータフロー図	29

表 目 次

5.1	システムの各コンポーネントが持つアプリケーションとその機能	18
5.2	システムで使用されるデータとセンサ	21
6.1	使用した技術スタック	23
7.1	STRIDEにおける脅威のカテゴリ	29
A.1	自動車における脅威	37
A.2	モバイルにおける脅威	38
A.3	検証者における脅威	38

第1章 序論

本章では本研究の背景、課題及び手法を提示し、本研究の概要を示す。

1.1 はじめに

インターネットの発展に伴い、あらゆるモノがネットワークに接続されることはもはや自然なことになった。Internet of Things と呼ばれるこの概念は急速に普及しており、ネットワークと接続するモノの範囲は拡大する一方である。自動車もその例外ではなく、車両に通信機能を搭載することで、外部ネットワークと常時接続される「コネクティッドカー」へと進化してきた [1]。とりわけ、テレマティクスと呼ばれる、自動車をはじめとする移動体に通信システムを搭載し、リアルタイムでデータを外部とやり取りすることを可能にする技術の発展は、自動車の運転や利用状況に関する詳細なデータ収集を可能にしてきた。これらのデータは長らく自動車の安全運行のためのシステム、例えば緊急通報システムやカーナビゲーションシステムといった形で交通安全に寄与してきたが、現代ではこれらのデータが非常に個人的なものであることに着目し、自動車の利用者一人ひとりに最適化したサービスを提供しようとする試みも行われている。利用ベース保険やカーシェアリングサービスはその代表であり、車両から抽出したデータに基づく多様な価値提供が進んでいる。

しかしながら、現在普及しつつあるコネクティッドカーを基盤としたサービスにおいては、自動車から抽出されたデータは自動車メーカーや特定のサービス事業者のクラウドやデータセンター内に閉じた形で保管されていることがほとんどである。そのため、利用者が自身の運転データを外部へ持ち出したり、サービスを乗り換える際に過去の運転データを引き継いだりすることが非常に困難である、すなわちベンダーロックインに陥るという問題が発生している。また、データが分断されてサイロ構造に閉じ込められていると、利用者自身が自らの自動車から抽出されたデータへアクセスあるいはコントロールできないという問題も発生する。一方で、事業者がこのような構造を取らざるを得ない理由の一つとして、自動車から直接データを取得しない限り、データの真正性を担保できないという技術的な問題も存在する。

そこで本研究では、このような問題に対し、利用者を自動車と事業者の中間に論理的に配置してデータへのアクセスおよびコントロール可能性を持たせ、その上でデータの真正性を担保する新たな運転歴データの管理・提示モデルを提案する。さらにこのモデルを評価するために、Verifiable Credentials と Decentralized Identifiers という技術を用いたシステムを設計した上で概念実証として実装し、実際に動作確認を行う。以上により、利用者

自身がデータに対するアクセスおよびコントロールが可能でありながら、データの真正性が担保され、複数の主体間で安全かつ拡張可能な形で運転歴データの利用が可能となる仕組みを構築する。

1.2 本論文の構成

本論文における以降の構成は次の通りである。

2 章では、本研究の背景を述べる。3 章では、本研究において基盤となる技術を述べる。4 章では、本研究における問題の定義と、解決するための要件の整理を行う。5 章では、本研究の提案手法を述べる。6 章では、5 章で述べたシステムの実装について述べる。7 章では、4 章で求められた課題に対しての評価を行い、考察する。8 章では、本研究のまとめと課題、そして今後の展望についてまとめる。

第2章 背景

本章では本研究の背景について述べる。

2.1 自動車の情報化

インターネットの発展に伴い、コンピュータだけではなく、あらゆるモノがネットワークで接続しあうことがもはや当たり前となった。このような、モノとモノがネットワークを介して繋がる技術は“Internet of Things”の略称である IoT と呼ばれ、社会のデジタル化に欠かせない技術となっている。自動車も例外ではなく、ネットワークと自動車を接続することで自動車自体を情報化し、道路交通情報をシステム化することができる。道路交通に関する総合的な情報通信システムは高度道路交通システムと称され、“Intelligent Transport Systems”の略称である ITS と呼ばれる。自動車の情報化は社会全体の利益に繋がり、その必要性は高い。例えば、複数の自動車からデータを集めて分析することで、渋滞の緩和に役立てようという試みはその一例である。自動車の自動化は、自動車と情報通信に関連する分野に貢献することで、情報通信社会を支援する役割も期待されている。

2.2 コネクティッドカーとテレマティクス

本節では、コネクティッドカーとそれを支える技術であるテレマティクスについて概説し、その活用事例及び発展の展望を紹介する。

2.2.1 コネクティッドカーとテレマティクスの概要

コネクティッドカーとは、外部ネットワークと接続する機能を備えた自動車と定義される。自動車に通信システムを搭載することで、リアルタイムに外部とデータのやり取りを行うことができ、このように移動体に通信手段を搭載し、外部と情報をやり取りする技術をテレマティクスと呼ぶ。なお、テレマティクスは IoT の一種であり、「テレマティクス (telematics)」という語は「テレコミュニケーション (telecommunication)」と「インフォマティクス (informatics)」を組み合わせた造語である。コネクティッドカーは、テレマティクスによって外部ネットワークに接続している自動車そのものである。テレマティクスに対応したコネクティッドカーには TCU (Telematics Control Unit = テレマティクス制御ユニット) と呼ばれる部品が搭載され、TCU は自動車の ECU (Electronic Control

Unit = 電子制御ユニット)と接続し、自動車の各部から抽出した様々なデータを用いて外部ネットワークとの通信を行う。また、コネクティッドカーにおいては“Over The Air (OTA)” [2] という技術を用いることで車載ソフトウェアの更新を無線ネットワーク経由で行うことができるのも特徴である。

2.2.2 テレマティクスの活用事例

テレマティクスを用いることで、様々なシステムが実現している。例えば、自動車が関係する事故や事件などの非常事態が発生した際に、警察や救急、自動車メーカーや保険会社などに通報する緊急通報システムや、車両が盗難された時に位置情報を元に追跡が可能な車両盗難追跡システムなどである。また、テレマティクスを用いるサービスも多く存在し、代表的なものとして利用ベース保険が挙げられる。利用ベース保険の詳細については後述する。

2.2.3 コネクティッドカーの発展と展望

コネクティッドカーは車両に備わった通信機能によりリアルタイムで外部ネットワークとのデータのやり取りを行い、安全性と利便性、そしてシステム・サービス間の連携機能を大きく発展させてきた。テレマティクスを用いるシステムやサービスの利用拡大に伴い、自動車が「移動するデジタル端末」として機能し始め、今後は自動運転やEV、そしてMaaS (Mobility as a Service)との統合が進むことで、車両データを基盤とした新たなエコシステムの中心的役割を担うことも期待される。コネクティッドカーはテレマティクスを用いるシステムの発展とともに新車台数に占める割合が年々増加しており、2030年には新規に出荷される乗用車のうち95%以上を占めると予想されている [3]。

2.3 車両データを用いるサービス

コネクティッドカーから抽出したデータを利活用するサービスは多く存在するが、本節ではその中でも特に運転に関する車両データを用いるサービスについて紹介する。運転に関する、とは速度や加速度、位置情報や時間、あるいはスロットル開度やステアリング角度など、自動車の動きの中でドライバーの「操作する」という動きと直接繋がって変化するデータであるとここでは定義する。なお、自動車からデータを抽出する方法としてはOBD-IIコネクタやスマートフォン、EDR (Event Data Recorder。車載ブラックボックスとも呼ばれる)などが存在する [4]。

2.3.1 利用ベース保険

利用ベース保険はテレマティクス保険とも呼ばれ、自動車から抽出・収集した運転データを基に保険料を算出する保険である。従来の自動車保険は大数の法則に基づき、過去の

膨大な統計データを元に保険料を算出していたが、利用ベース保険ではより詳細な、利用者ごとにカスタマイズされた保険料を算出することができる。例えば、責任感を持ち、安全な運転志向を持つドライバーは大きな割引を受けることができる一方、危険な運転志向を持つドライバーに対しては保険料を高く設定することができるため、これにより保険会社のリスクを低減することが可能となる。なお、保険料の算出方法として主流なものはPAYD (Pay As You Drive) とPHYD (Pay How You Drive) であり、前者は走行距離に連動し、後者は運転の仕方に連動するものである。運転の仕方には、平均速度、加速や減速の度合い、運転する場所、運転する時間などが含まれる。利用ベース保険は特に北米市場で高い需要があり、2030年までには世界市場で11.34%の年平均成長率で拡大すると予測されている [5] [6]。

2.3.2 カーシェアリングサービス

カーシェアリングサービスは、登録された自動車を会員が共同で使用するサービスである。登録される自動車の所有者が個人であるか法人であるかや、登録される自動車の種類によって異なる様々なサービスが存在する。組織的なカーシェアリングサービス自体は1980年代後半にヨーロッパで始まり、日本では2002年に初の民営会社が発足したように決して新しいサービスではないが、近年のシェアリングエコノミー及びコネクティッドカーの普及により事業者数・利用者数ともに急激に規模を拡大しているサービスもある。現在のカーシェアリングサービスでは、利用者が利用開始時に自身のスマートフォン内のモバイルアプリケーションを用いて自動車を解錠・施錠したり、利用者の運転歴データを事業者が収集したりすることが一般的である。例えば、パーク24グループが運営するカーシェアリングサービスであるタイムズカーにおいては、急加速・急減速などをリアルタイムで観測し、これらのデータを元に安全な運転を判定したうえで利用者にポイントを付与している。無事故走行距離とポイントに応じて利用者は4段階に分かれたステージに振り分けられ、ステージに応じて利用料金の割引などの恩恵を受けられる。

2.4 本章のまとめ

本章では、研究の背景について述べた。まず、インターネットの発展に伴い、自動車もネットワークと接続するコネクティッドカーへと進化しつつあることと、自動車がネットワークと接続する技術であるテレマティクスについて示した。また、コネクティッドカーから車両データを抽出し価値提供を行うサービスについて紹介した。

次章では、本研究の基盤となる技術について紹介する。

第3章 基盤技術

本章では、提案するシステムの基盤となる技術について紹介する。

3.1 デジタル証明書と構成技術

本節では、本研究におけるデジタル証明書の定義と、その構成技術について解説する。

3.1.1 デジタル証明書

通常、デジタル証明書は公開鍵と公開鍵の所有者を紐づける証明書（公開鍵証明書）を指すことが一般的だが、本研究では、ある主体に対する証明書発行者の主張を表現したデジタルデータと定義する。これらの主張には身分証明に関する個人情報から資格情報、ひいては大学の成績など多様な情報が含むことができ、デジタル証明書はこれらの情報を電子的に表現した上で第三者に対する提示・検証を可能とするための手段である。一般的に、デジタル証明書は以下のようないくつかの要素を持つ。

- 発行者情報：デジタル証明書の発行者を識別するための情報
- 証明書の主体：証明書の主張の対象となる主体を識別するための情報
- 主張内容：発行者が証明書の主体について主張するなんらかの情報
- 有効期限：証明書の有効期限に関する情報
- 完全性の証明：証明書が改ざんされていないことを示すための情報

これらの要素はデジタル証明書のデータモデルに従い表現され、様々な標準化団体が多様なデータモデルを提案している。その一例である、W3CによるVerifiable Credentials Data Modelについては後述する。また、デジタル証明書はシリアル化されてデジタルデータに変換されるが、代表的なシリアル化形式としてはJSON, CBORなどがある [7] [8]。

3.1.2 暗号学的ハッシュ関数

ハッシュ関数とは、任意の長さのデータから要約された値（ハッシュ値）を得る関数であり、特に暗号や情報セキュリティの用途に適した性質を持つものを暗号学的ハッシュ関

数と呼ぶ。同じ入力値からは常に同じハッシュ値を得られ、またハッシュ値から入力値を計算することは困難であるという性質がある。公開鍵暗号やデジタル署名でも用いられている技術であり、以下の特性を持つ。

- 原像計算困難性：あるハッシュ値から元の入力値を計算することが困難である
- 弱衝突耐性：ある入力値とハッシュ値のペアがあったとき、同じハッシュ値を持つ異なる入力値を計算することが困難である
- 強衝突耐性：同じハッシュ値を持つ2つの異なる入力値のペアを計算することが困難である

なお代表的な暗号学的ハッシュ関数としては、SHA-256などが挙げられる。

ハッシュ値を用いた技術としてはハッシュチェーンが存在する。ハッシュチェーンは、連続するハッシュ値を順番に連結して作られるチェーン状のデータ構造であり、含まれるデータの整合性を保ち、改ざんされた場合はその検知が可能である。ブロックチェーンにおいて、個々のブロックの整合性を担保するために使用されているのも、ハッシュチェーンである [9]。

3.1.3 公開鍵暗号

公開鍵暗号は、暗号化と復号で異なる2つの鍵を使用する暗号方式である。2つの鍵はそれぞれ秘密鍵と公開鍵と呼ばれ、秘密鍵はその所有者によって秘密を保って管理される鍵であり、秘密鍵と対になる公開鍵は広く公開され、第三者が参照・利用可能な鍵である。公開鍵暗号は広く用いられており、例えばインターネット上の通信を保護するためのプロトコルであるSSL/TLSで利用されている。公開鍵暗号の代表的なアルゴリズムとしては、RSA(Rivest-Shamir-Adleman)、DSA(Digital Signature Algorithm)、ECDSA(Elliptic Curve Digital Signature Algorithm)などが挙げられる [10]。

3.1.4 デジタル署名

デジタル署名は、あるデジタルデータが特定の主体により作成されたこと、かつ作成されたのちに改ざんされていないことを検証可能にするための技術である。デジタル署名は、以下のプロセスで作成・検証される。

- 作成プロセス
 1. ハッシュ値の計算：署名者は、署名したいデータからハッシュ値を計算する
 2. 秘密鍵による署名：計算されたハッシュ値に対して、署名者の秘密鍵を使用して暗号化を行い、署名を生成する。この生成された値がデジタル署名となる
- 検証プロセス

1. 公開鍵の入手：まず、検証者は署名者の公開鍵を入手する。通常、公開鍵は、公開鍵と公開鍵の所有者を紐づける公開鍵証明書の形で配布されている
2. ハッシュ値の再計算：受け取ったデータからハッシュ値を再計算する
3. 署名の検証：署名者の公開鍵を用いて復号したハッシュ値と再計算したハッシュ値を比較し、一致すれば検証が成功したと言える

3.2 Verifiable Credentials と Decentralized Identifiers

本節では、デジタル証明書の一形態である Verifiable Credentials [11] と、それを支える識別子である Decentralized Identifiers [12] について解説する。また、デジタル証明書の文脈で重要な機能である選択的開示と、アプリケーションとして欠かせないウォレットアプリケーションについても解説する。

3.2.1 Verifiable Credentials

前節で解説したデジタル証明書の一つの形態として、Verifiable Credentials がある。Verifiable Credentials は W3C が標準化を進めており、一般的に Verifiable Credentials といえば W3C による “W3C VC” を指す。Verifiable Credentials はデジタル証明書そのものであり、Verifiable Credentials のためのデータモデルとして Verifiable Credentials Data Model が存在する。広義の Verifiable Credentials として、ISO/IEC 18013-5 で定義された mdoc/mDL [13] や、IETF が標準化を進める SD-JWT VC [14] なども存在するが本稿では詳しくは触れない。なお、Verifiable Credentials は “VCs”、Verifiable Credentials Data Model は “VCDM” と呼ばれることが一般的なため、本稿でもこれ以降この呼称を用いる。

VCs とは、検証可能な証明書のことであり、暗号学的な手法で改ざん検知、および正当に発行されたものであるかの検証を可能にしたクレデンシャルのことである。クレデンシャルとは、発行者によって発行された、対象となる主体に対する何らかの主張（クレームと呼ばれる）の組と定義される。例えば、髪が黒く、眼鏡をかけた男性がいた場合、クレームは「髪が黒い」「眼鏡をかけている」「男性である」の3つとなり、これをまとめたものがクレデンシャルとなる。さらにこのクレデンシャルを暗号学的に改ざん検知、正当に発行されたものであるか検証できるようにしたもののが VCs、といったイメージである。

VCs の基本的には構造は、発行者 (Issuer)、保持者 (Holder)、検証者 (Verifier) という三者の役割分担を前提としている。なお、この三者が登場するモデルは IHV モデルと呼ばれる。VCs の発行から検証までの一連の流れは下記の通りである。

1. 発行：発行者が特定の主体 (Subject と呼ばれる) に関するクレデンシャルを用意し、暗号学的な署名を施す。完成したら、Holder に送信する。多くの場合 Subject と Holder は一致するが、異なっても構わない
2. 保持・提示：Holder は Issuer から送信された VCs を受け取り、後述するウォレットアプリケーションなどに保持する。任意のタイミングで Verifier に VCs を提示する

3. 検証：Verifier は Holder から送信された VCs から検証に必要な公開鍵情報を取り出し、公開鍵を用意した上で VCs を検証する

また、各主体はデータを“Verifiable Data Registry”と呼ばれるデータ保管場所とやり取りする。図 3.1 は三者の役割分担と一連の流れを示したものである。

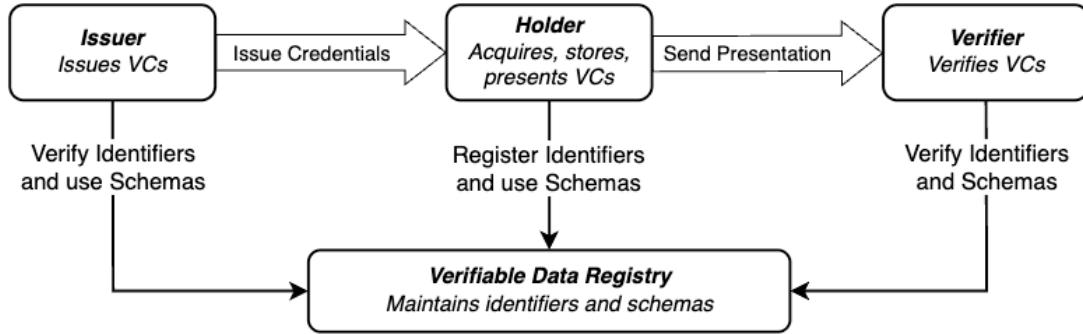


図 3.1: VCs における IHV モデルと仕組み

また、Holder が複数の VCs を保持したり、まとめて Verifier に提示したりするユースケースがあることは容易に考えられる。そのため、VCs には複数の VCs を合わせて提示する Verifiable Presentations という形式も存在する。Verifiable Presentations には、その Verifiable Presentations が正しく構成されていることを示す証明と、提示者が Holder であることを示す証明が含まれる。なお、Verifiable Presentations も“VP”と一般的に呼ばれるため、本稿でもこれ以降この呼称を用いる。

3.2.2 Decentralized Identifiers

Decentralized Identifiers は識別子の一種である。従来のアイデンティティ管理システムで用いられるような ID とは異なり、中央集権的な構造によって管理されないため異なるシステム間で相互運用性を持たせられたり、利用者が ID を自己管理できたりするというメリットがある。VCs でも各主体の識別子としては Decentralized Identifiers が用いられることがほとんどである。なお、Decentralized Identifiers は一般的には“DIDs”と呼ばれるため、本稿でもこれ以降この呼称を用いる。

DIDs 自体は下図のような構造を持つ。“Scheme”はこの識別子が DIDs であることを示す。“DID Method”はこの DIDs がどのタイプの DIDs であるかを示すもので、主に DID Document（後述）の置き場所により多くの種類が存在し、代表的なものでは did:web, did:key, did:ion などが挙げられる [15] [16] [17]。“DID Method-Specific Identifier”は各 DID Method の名前空間内での一意な識別子である。

また、DIDs は下図のようなエコシステムを持つ。DIDs 単体は識別子に過ぎないため、DIDs に関するより詳細な情報を記載したデータとして“DID Document”が存在し、さら

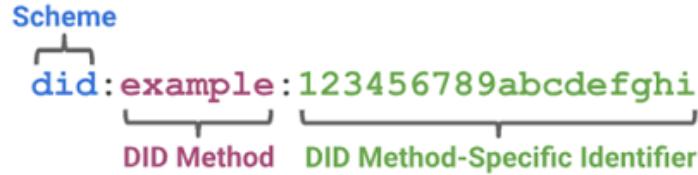


図 3.2: DIDs の例

に DID Document を補助する役割を果たす “DID Controller” と “DID URL” が存在する。“Verifiable Data Registry” は DIDs, DID Document の置き場所として利用され、ブロックチェーンなどの分散型台帳技術が用いられることが多い。なお、DIDs から DID document を引くことを “resolve” といい、本稿ではこれ以降解決すると呼称する。

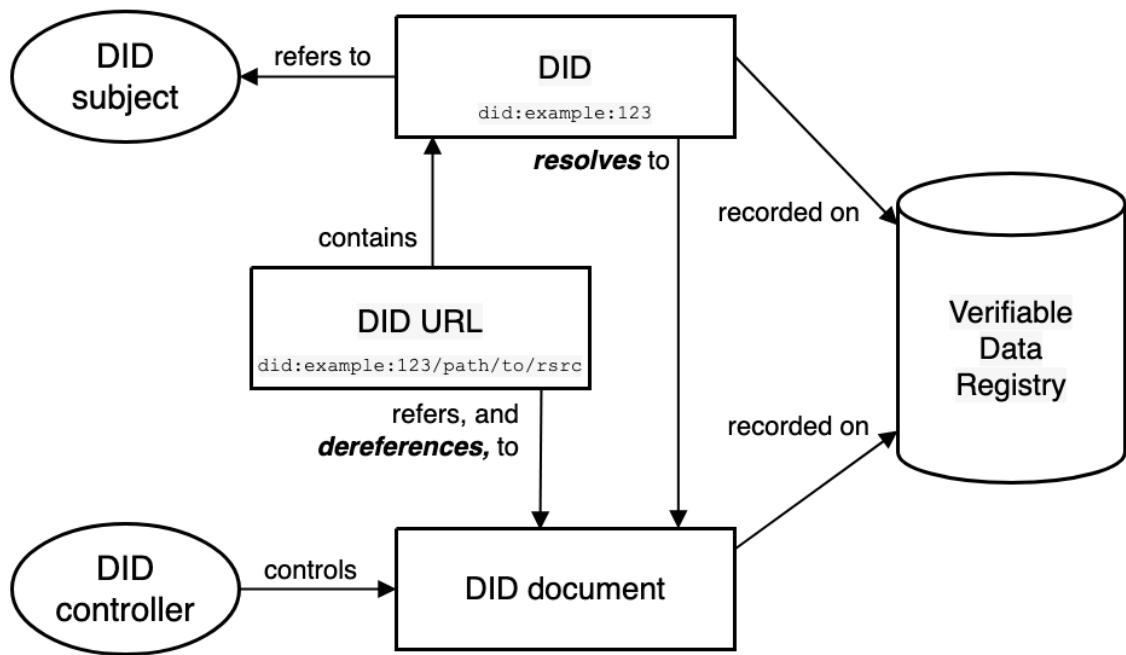


図 3.3: DIDs のエコシステム

3.2.3 選択的開示

VCs や DIDs の文脈で重要な機能の一つが、選択的開示である [18]。選択的開示とは、Holder が Verifier に提示を行う際、開示する内容をコントロールできる機能である。例えば、20 歳以上であることを示しアルコール飲料を購入するユースケースでは、従来ならば年齢を確認できる証明書の記載内容を全て開示していたが、選択的開示を用いることで検証に必要な属性（運転免許証であるならば、顔写真と年齢）の欄のみを開示すればよくなる。選択的開示を用いることで、Holder は Verifier に対して必要以上の情報を開示することがなくなり、Holder のプライバシーを保護することにつながる。選択的開示の具体

的なアルゴリズムとしては、Selective Disclosure for JWTs(SD-JWT) [19] や、ゼロ知識証明を用いたものなどが提案されている。

3.2.4 ウォレットアプリケーション

IHV モデルにおいて、Holder が VCs などのデジタル証明書を保持するには何らかの「器」が必要である。そこで登場するのがウォレットアプリケーションであり、Holder が Issuer から発行されたデジタル証明書を格納して Verifier に提示するのに用いられる [20]。ウォレットアプリケーションには複数のデジタル証明書を格納でき、提示する際の組み合わせも自在である。また、前述した選択的開示をサポートする実装なども存在している。

3.3 本章のまとめ

本章では、研究の基盤技術について紹介した。まず、デジタル証明書とその構成技術である暗号学的ハッシュ関数、公開鍵暗号、デジタル署名について紹介した上で、デジタル証明書の一つの形態である VCs とそれに関連した一連の技術である DIDs、選択的開示についても紹介した。

次章では、既存システムにおける問題点について議論する。

第4章 本研究における問題定義

本章では、既存システムにおいて本研究が着目する問題について述べる。

4.1 既存システムにおけるデータの流れ

2.2節及び2.3節で紹介した既存サービスにおいて採用されているシステムにおいては、基本的にコネクティッドカーから抽出・収集されたデータは自動車から自動車メーカーやサービス事業者（以下、まとめて事業者と呼称）が接続しているクラウドへと流れ、クラウドで処理をされた後にそれぞれの事業者へと提供され蓄積されている。システムにおけるデータの流れを見てみると、データは自動車と事業者間を繋ぐネットワーク内にのみ存在している（図4.1参照）。トヨタ自動車のサービスであるT-Connectのように、モバイルアプリケーションへの配信などを通じて利用者にデータを提供するものも一部存在するが、あくまでサービスの一環としてわざわざデータをモバイルアプリケーションにも提供しているに過ぎず、本質的なデータの流れは変わらないと言える。

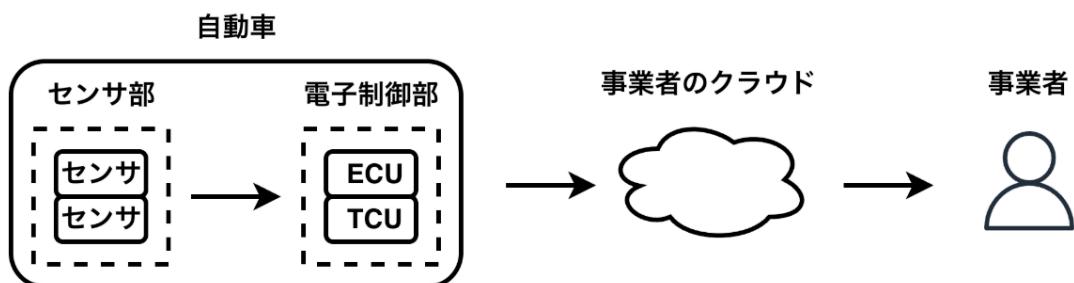


図 4.1: 既存システムにおけるデータの流れ

4.2 既存システムの問題点

前節で述べたデータの流れは、既存サービスが当てはまる登場人物が利用者と事業者のみ、というようないわば一対一のユースケースにおいては十分である。しかしながら、特定の事業者との間でのみデータを共有する既存システムは、ベンダーロックインを容易に招き、利用者にサービスの乗り換えという選択肢を与えない。また、実際のデータは利用者の自動車から事業者のクラウドに送信されて蓄積されているため、利用者が自身の自動

車から抽出されたデータへのアクセスあるいはコントロールが可能であるとも言い難い。現在では、事業者間でデータを共有できるかどうかはひとえにそれぞれの事業者の判断に委ねられている。実際の例で言えば、タイムズカーにおいては、無事故走行距離とポイントに応じて利用者は4段階に分かれたステージに振り分けられ、ステージに応じて割引などの恩恵を受けられるが、このステージは他のカーシェアリング事業者（オリックスカーシェアや三井のカーシェア）においては全く意味をなさない。言い換えるならば、複数の事業者にまたがってデータを共有する際、既存サービスでは事業者間の連携が不可欠である。また、このようなシステムでは、事業者どうしが結託して利用者に断りなくデータを共有する事態が発生する可能性も否定できない。

次項からは、この問題を構成している要因についてそれぞれ述べる。

4.2.1 データのサイロ化

前述したように、既存サービスを構成しているシステムにおいてはコネクティッドカーから収集されたデータは自動車から事業者が接続しているクラウドへと流れ、クラウドで処理をされた後に事業者へと提供され蓄積される。このようなシステムでは、自動車と事業者の確立するネットワークは非常に閉鎖的であり、常にその間にデータが閉じているためサイロ化とでも言うべき状態が出現する。利用者が複数の事業者を利用する場合、互いに独立したサイロが事業者の数だけ存在していることになり、これが事業者間の連携を難しくしている要因の一つでもある。

4.2.2 データに対するアクセス及びコントロールの欠如

サイロが構成されていると言っても、データはコネクティッドカーから抽出された後に事業者と接続したクラウドにて処理・蓄積されるため、利用者が実際にデータにアクセスしたり、データをコントロールしたりすることは不可能に近い。また、利用者は自身の自動車からどのようなデータが事業者に渡り、それがどのように扱われているかについて知ることはできない。データが利用者のアクセスあるいはコントロール可能な場所にないため、事業者が仮にデータを不正に利用したり、許可なく他の事業者と共有したりしても利用者がそれを検知することができないという問題点も存在する。仮に利用者が自分の自動車から抽出されたデータにアクセスし、それをコントロールすることが可能であれば、そのデータを複数の事業者に対して提示できる可能性が出てくるが、そのようなシステムは現在存在しない。

4.2.3 データの真正性の担保

仮に利用者のアクセスあるいはコントロール可能な場所にデータが移り、その上で利用者がデータを事業者に提示できるようになったとしても、提示された事業者がそのデータの真正性を検証できるとは限らない。コネクティッドカーから直接データを抽出する構造

のシステムでない以上、利用者がデータを偽造・改ざんしていたり、他人の自動車から抽出したデータを提示してきたりする可能性を否定できないためである。そのため、既存サービスのシステムではデータの真正性を担保するために、事業者が認めた自動車メーカーが製造したコネクティッドカーから、安全な通信経路を経由してクラウドにデータを送信する構造を採用しているとも言える。

4.2.4 各事業者のポリシーの相違

さらに、これまでに述べた要因が取り除かれたとしても、各事業者のポリシーの相違によってデータを共有することができない場合がある。これには2つのパターンがあり、データ取得時のポリシーと、データ利用時のポリシーの差異がある。データ取得時のポリシーとは文字通りどのようなデータを取得するかを判断する際のポリシーであり、例えばA社ではスロットル開度を取得しない一方B社では取得しているとしたら、A社からB社へデータを持ち越すのは困難になる。データ利用時のポリシーとは取得したデータを用いて利用者を判断する際のポリシーであり、先ほどの例ではタイムズカーではこれに基づき利用者を4段階のステージに振り分けるが、ポリシーを共有しない他社ではこのステージでは全く意味がなくなってしまう。このような場合はポリシー実行後の状態のみを共有するのではなく、元のデータとポリシーの両方を合わせて提示するなどの工夫が必要になるだろう。いずれにせよ、各事業者はそれぞれ異なるポリシーを持っており、判断に用いられるデータは同じでも、例えば保険会社では総合した安全運転の実績を重視する一方、カーシェアリングサービスでは急な加減速の有無を重視するなど、ポリシーによってデータの評価基準が異なってしまい、複数の事業者にまたがってデータを共有することを難しくしている。

4.3 本章のまとめ

本章では、既存システムの問題点を洗い出した。まず、既存サービスを構成しているシステムにおいてデータがどのように流れているかを示した。続いて、そのデータの流れが持つ問題点を洗い出した。

次章では、以上の問題点を解決するシステムを提案する。

第5章 提案手法

本章では、第4章で提示した問題を解決するために必要な要件を示し、前提条件も示した上で利用者のデータへのコントロール可能性とデータの真正性の担保を両立する手法およびシステムを提案する。

5.1 システムの満たすべき要件

提案するシステムは、以下の要件を満たすことが望ましい。

5.1.1 データに対するアクセスおよびコントロール可能性

利用者が自身の自動車から抽出したデータにアクセスし、コントロールできること。ここで言うコントロールとは、データがどこに所在しており、かつどのような内容が含まれるか利用者自身が把握しており、また任意の事業者に対してデータを提示することが可能なことを指すものであり、利用者が自由にデータを改変したり移転したりすることができるなどを指すものではない。

5.1.2 データの真正性の担保

データを検証した者は誰でも、そのデータが偽造・改ざんされていないことを確認できること。具体的には、検証者が利用者から提示されたデータを検証したとき、データが適格かつ望ましい自動車から取得されたものであり、利用者が他者になりすまして他者の自動車から取得したデータを提示してきていないことや、データを偽造あるいは改ざんした上で提示してきていないことを検証できることを指す。

5.2 前提条件

本提案手法は以下の前提条件を持つ。

自動車は純正である 自動車はメーカーが製造したままの状態であり、改造などを施されていない状態（純正）であること。例えば、自動車愛好家の間で行われるようなカスタム・チューニングを施された自動車などであれば、この条件を満たさない。ここで言う「改造」とは、メーカーが自動車を設計した段階で利用者が自動車はこの

ように使用すると想定した方法から著しく逸脱して使用されていないことを指し、利用者が世間と同程度のレベルでの使用をしていれば満たされるであろう条件である。センサや ECU, TCU などが改変されることはデータが改ざんされることと同義と言え、前述した要件を満たせなくなるため、このような改造された自動車は本提案手法の適用の対象外とした。

自動車メーカーは不正を行わない 自動車メーカーが自動車の製造時に不正な行為を行わないこと。例えば、自動車メーカーが実馬力よりも低い数値を公表したりしていた場合、不正行為にあたりこの条件を満たさない。検証に際し、事業者が自動車から抽出したデータが真正性を持つと考えているのは自動車メーカーが不正を行わない信じているためであることは前述のとおりであるが、自動車メーカー自体が不正な行為を行うとその信用が損なわれてしまう。そのため、このような事例は本提案手法の検討対象外とした。

自動車はコネクティッドカーである 提案手法の対象となる自動車はコネクティッドカーであること。電子制御を持たない自動車は ECU や TCU を持たず、結果当然として鍵ペアなども持てないため、モバイルとの間に通信経路を確立したり、データを送信することはおろか、データを抽出することすら困難な場合が多い。その場合、提案手法が一切適用できなくなってしまうため、このような自動車は本提案手法の適用の対象外とした。

5.3 提案手法の概要

第 4 章で示したように、既存システムではデータが自動車と事業者の間に閉じることでデータがサイロ化し、利用者にとってサービスの乗り換えが難しくなり、また自身の自動車から抽出したデータにアクセスあるいはコントロールすることができないためデータがどのように扱われているか感知できないという問題が存在する。また、事業者から見てもポリシーの差異によりデータを元に判定・スコアリングされた利用者をそのまま受け入れることはできず、さらにデータそのものを提示しても自動車から直に抽出した物でない以上利用者による改ざん・なりすましのリスクがつきまとうため受け入れることができないことも示した。

提案手法ではデータの流れに中心に利用者を論理的に配置し、自動車から抽出したデータをもとに VCs を発行した上で利用者に渡す。利用者は VCs を受け取った後、ウォレットアプリケーションに格納し、望むタイミングで VCs から VP を構成し、検証者に提示する。検証者は VP に含まれる公開鍵情報をもとに検証を行い、データの真正性を検証する。VCs の特性により、検証者は当該 VCs が適切な自動車から発行されたものであることが確認でき、利用者も自身の自動車から抽出したデータに対するアクセスおよびコントロールを獲得できる可能性がある。本研究ではこの手法が実現可能であることを示すために、提案手法に沿ったシステムを設計した。

5.4 全体構造

本節では、まず提案するシステムのアーキテクチャについて示した後、データおよび処理の一連の流れについて示す。また、具体的なコンポーネントとしての自動車、モバイル、検証者のそれぞれが持つアプリケーションについても説明する。

5.4.1 システムアーキテクチャ

図 5.1 は提案するシステムの論理アーキテクチャである。

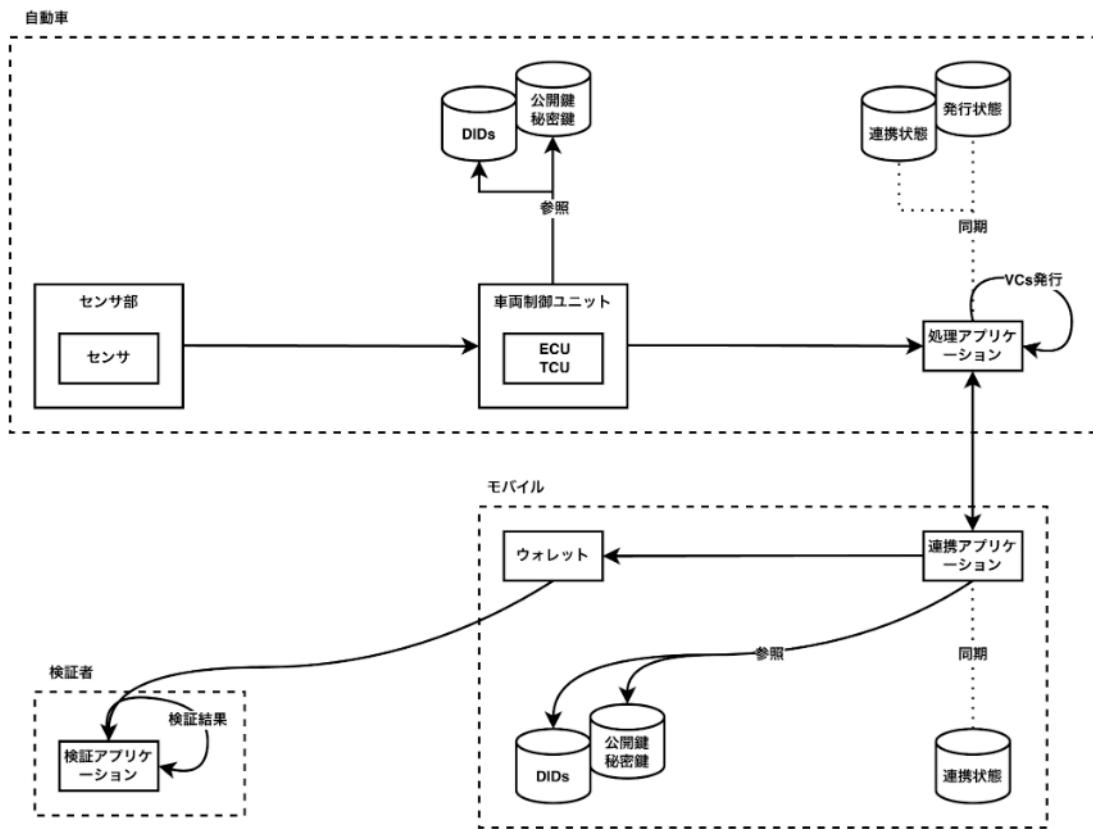


図 5.1: 提案するシステムの論理アーキテクチャ

本システムは自動車、モバイル、検証者の3つのコンポーネントから構成される。

自動車はコネクティッドカーが持つ機能各種センサ、ECU や TCU などの車両制御ユニット、鍵ペア、識別子など)に加え、データを処理するための処理アプリケーションを持つ。処理アプリケーションの持つ機能は、モバイルとの連携、自動車の各部から抽出・取得したデータを元にVCsを発行、VCsの送信、状態管理である。モバイルは通常モバイルが持つ機能(鍵ペア、識別子など)に加え、自動車と連携するための連携アプリケーションとVCsを保持・提示するためのウォレットアプリケーションを持つ。連携アプリケーションの持つ機能は自動車との連携、VCsの受け取り、ウォレットアプリケーション

への送信、状態管理であり、ウォレットアプリケーションの持つ機能は VCs の保持、VP の構成、VCs および VP の提示である。検証者は検証アプリケーションを持つ事業者である。検証アプリケーションは提示された VP から公開鍵を解決し、含まれるデータの真正性の検証を行う機能を持つ。表 5.1 は、各コンポーネントが持つアプリケーションとその機能をまとめた表である。

表 5.1: システムの各コンポーネントが持つアプリケーションとその機能

コンポーネント	アプリケーション	機能
自動車	処理アプリケーション	モバイルとの連携、VCs の発行、VCs の送信、状態管理
モバイル	連携アプリケーション	自動車との連携、VCs の受け取り、ウォレットアプリケーションへの送信、状態管理
	ウォレットアプリケーション	VCs の保持、VP の構成、VCs および VP の提示
検証者	検証アプリケーション	公開鍵の解決、真正性の検証

5.4.2 データおよび処理の流れ

図 5.2 は、提案するシステムのシーケンス図である。システムは、処理の段階に応じて 3 つのフェーズに分類される。それぞれ連携フェーズ、データ処理フェーズ、検証フェーズであり、関係するコンポーネント・アプリケーションが異なる。

まず、連携フェーズにおいて、自動車の処理アプリケーションとモバイルの連携アプリケーションが連携する。連携の際、処理アプリケーションは自動車内の、連携アプリケーションはモバイル内の鍵ペアをそれぞれ用い、チャンレンジレスポンス認証を行った上で通信経路を確立する。通信経路が確立すると、それぞれのコンポーネント内で連携の状態を管理しているデータベースなどと通信し、連携状態を同期する。

自動車とモバイルの連携が完了すると、VCs を発行することが可能になるため、処理フェーズへ移行する。自動車が各種センサからデータを取得し、EUC や TCU などの車両制御ユニットを介して処理アプリケーションへとデータが送られる。処理アプリケーションでは同期されている VCs 発行状態を参照しながら、連携時に自動車から取得した鍵ペアを用いて VCs を作成し、連携フェーズで確立した通信路を用いてモバイルに VCs を逐次送信する。モバイルでは連携アプリケーションが VCs を逐次受け取り、ウォレットアプリケーションへと送信する。ウォレットアプリケーションでは受け取った VCs を格納し、保持する。

検証者が検証情報の提示を求める状態が発生すると検証フェーズへと移行する。このような事態になる要因としては、利用者が新規サービスを申し込む、既存サービスを乗り換える、などが考えられる。利用者はモバイル内の鍵ペアを用いてウォレットアプリケーションに格納された VCs から VP を構成し、検証者へと提示する。なお、実際のデータは複数回にわたり VCs へ処理されることが想定され、また車両自体の識別子の真正性を担

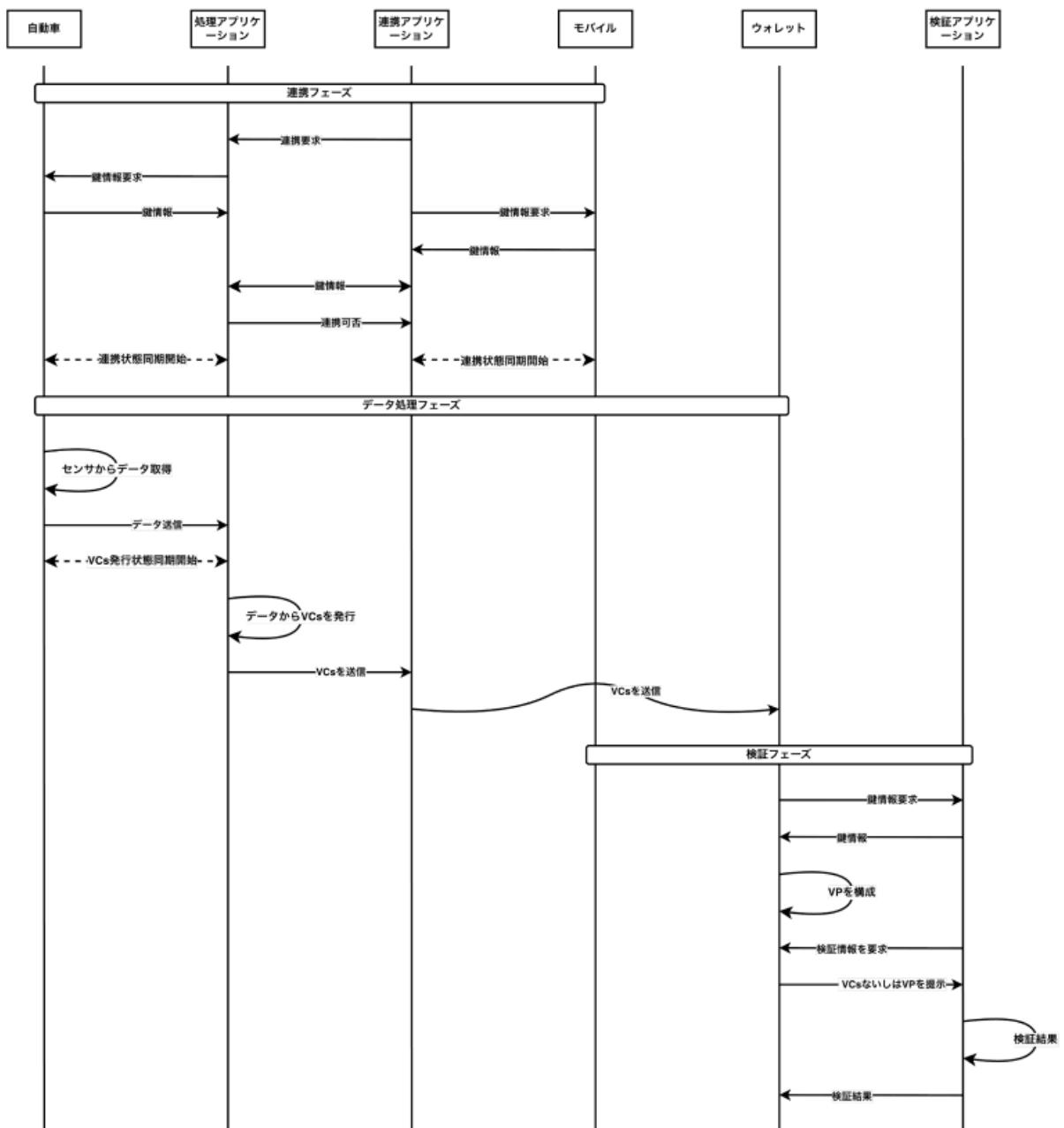


図 5.2: 提案するシステムのシーケンス図

保するための VCs も必要であることから利用者が検証者へ提示するのは必然的に VP になる。検証アプリケーションは VP を受け取ったら、含まれる DIDs から DID Document を解決し、自動車と利用者の公開鍵情報を取得する。取得した公開鍵情報を元に VP を検証し、検証結果を利用者へと返す。

以上が一連の処理の流れである。

5.4.3 処理アプリケーション

処理アプリケーションは、モバイルの連携アプリケーションとの間の通信経路の確立と、自動車内の各種センサから取得した情報をVCsに加工し、連携アプリケーションに送信するという2つの機能を持つ。通信経路の確立は、公開鍵基盤に基づいて行われ、自動車とモバイルアプリケーションそれぞれが持つ鍵ペアを用いて行われる。また、自動車はメーカーから割り振られた一意の自動車DIDsと、VCsに添付するための複数のデータDIDsを持つ。VCsを発行する際に、自動車DIDsとデータDIDsが紐づくことを示すVCsを添付することにより、データDIDsの出所を担保する。なお、この紐付きを示すVCsは、連携時に一度だけ添付すれば十分である。また、データをVCsに加工するときに用いる鍵ペアは、連携アプリケーションとの間の通信経路を確立するときに用いたものと同じものを用いる。

5.4.4 連携アプリケーション

連携アプリケーションは、自動車の処理アプリケーションとの間の通信経路の確立と、処理アプリケーションから送信されたVCsをウォレットアプリケーションに送信するという2つの機能を持つ。なお、通信経路の確立については、前項で述べたとおりである。連携アプリケーションは、連携時にモバイルの鍵ペアを用いる。

5.4.5 ウォレットアプリケーション

ウォレットアプリケーションは、同じモバイル内の連携アプリケーションから送信されたVCsを格納・保持することと、VCsからVPを構成した上で検証者に提示するという2つの機能を持つ。ウォレットアプリケーションは、VPの構成時にモバイルの鍵ペアを用いる。

5.4.6 検証者アプリケーション

検証者アプリケーションは、実際の事業者により多様に異なる実装をとると想定されるが、基本的な役割としては、送信されたVPを確認してその有効性及び真正性を検証することである。すなわち、必要な機能としては受け取ったVPをパースした後含まれるDIDsからDID Documentを解決し、自動車および利用者の公開鍵情報を取得してVPが適格に発行され、改ざんされておらずかつ失効していないことを検証することである。

5.5 データモデル

システム内で各コンポーネントとアプリケーションが連携するには、連携の基盤としてのデータモデルが必要である。本節では、具体的にどのようなデータがデータモデル含まれ、使用されるかについて述べる。

5.5.1 基本設計

基本設計として、データモデルには抽象化された自動車情報が含まれ、一定時間の間の状態を記述する。前提として、自動車から取得される情報は、車両やセンサごとに種類や精度にばらつきがあり、それら全てを網羅したデータ構成を用意することは非常に難しい。また、車両の性質による特殊な情報やメーカーのポリシーに依存した情報もあり、これらも全て含むことは非常に困難であるばかりかデータ量を増大させ、システムの肥大化をも招いてしまう。そのため、検証に必要であると想定されるデータセットを定義することでこれらのばらつきや差を吸収し、システムの基盤として利用していく必要がある。

なお、データは正規化されていることを想定している。例えば、センサのパルス数ではなく速度として算出されたものを使用する、電圧ではなく on/off の状態として算出されたものを使用するなどである。

5.5.2 データの構造

データセットとして、本研究では速度、加速度、回転角速度、ステアリング角度をデータモデルに含むこととした。各データは全て自動車の状態である。データモデルの策定に際しては、PHYD タイプの UBI 保険や道路交通安全に関する国際規格・国際標準を参照した [21] [22] [23] [24]。以下は、データモデルに含まれるデータが何を検出するためか、および実際にどのようなセンサから取得できるかを示した表である。

表 5.2: システムで使用されるデータとセンサ

データ	目的	センサ
速度	速度超過率の検知	車速センサ
加速度	急加速・急減速および加速度変化率の検知	加速度センサ
回転角速度	急旋回の検知	ジャイロセンサ
ステアリング角度	急旋回の検知	舵角センサ

また、以下は各データについての簡単な説明である。

速度 速度はより正確には車速と呼称され、文字どおり車の速さを表すベクトル値である。道路を設計するときに対象とされる自動車の速度（設計速度）などに基づき道路には最低速度・最高速度が規定され、道路の利用者は規定に従わなければならない。なお、規定に反した場合は刑事処分の対象となる。単位としては km/h が用いられる。

加速度 加速度とは決められた時間内で速度に変化が生じる割合のことである。加速度の変化を計測することによって、速度のみでは知り得なかった自動車の状態の変化、例えば急加速や急減速を検知することができる。単位としては m/s^2 が用いられる。

回転角速度 回転角速度とは、回転運動時の回転速度である。回転角速度を計測することで、自動車の旋回の状態、例えばコーナーをどのように曲がったかを検知できる。単位としては rad/s が用いられる。

ステアリング角度 ステアリング角度とは舵角とも呼称され、ステアリング（ハンドル）が方向転換時に切れる角度、すなわち切角のことである。ステアリングの最大切角を回転数で示したものがロックトゥロックであり、実際の値は自動車ごとにギア比などによって異なるが、一般的な乗用車がだいたい 1080° 900° （およそ 3 回転 2.5 回転）である。単位としては°が用いられる。

5.6 本章のまとめ

本章では、第 4 章で提示した問題を解決するための提案手法を示した。まず、データの流れの中心に論理的に利用者を配置することを提案し、システムを構成するにあたっての前提条件・満たすべき要件について述べた。さらに、具体的なシステムのアーキテクチャ、構成するアプリケーション、データ構造を設計した。

次章では、概念実証として実際に動作するシステムを実装する。

第6章 実装

本章では、第5章で提案したシステムの概念実証としての実装について述べる。

6.1 概念実証の範囲

前章で提案した手法を概念実証として実装し、実際に動作するシステムを構築する。実装するのは自動車アプリケーション、モバイルアプリケーション、検証者アプリケーションの3つであるが、概念実証にあたり、自動車アプリケーションは実際の自動車上の動作と同じ機能要件を満たせば良いと判断したため、車載アプリケーションをエミュレートする形で実装することとし、また、実際に自動車からデータを抽出するのではなく実際のデータを模したテストデータを利用する。図6.1は概念実証の範囲を示したものである。図5.1のうち、今回実装した機能を青く表示し、一部改変した図となっている。

この実装は提案手法の概念実証として行い、提案するシステムが十分に実現可能であるかどうかを検証することを目的としているため、提案システムのコアの部分、すなわちデータの真正性の担保とデータに対するアクセスおよびコントロール可能性の両立を実現する役割を持つコンポーネントを主に実装している。提案手法のうち、要件にあたる以上の部分の実現可能性を検討するために特定の機能に絞って実装を行なった。

6.2 実装の概要

本節では実装の詳細について説明する。

6.2.1 技術スタック

実装にあたっての技術スタックとしては、以下を用いた。

表 6.1: 使用した技術スタック

要素	要素名
言語	TypeScript
VCs/VP ライブラリ	@trustknots/vcknots
DID メソッド	did:web
ハッシュアルゴリズム	SHA-256

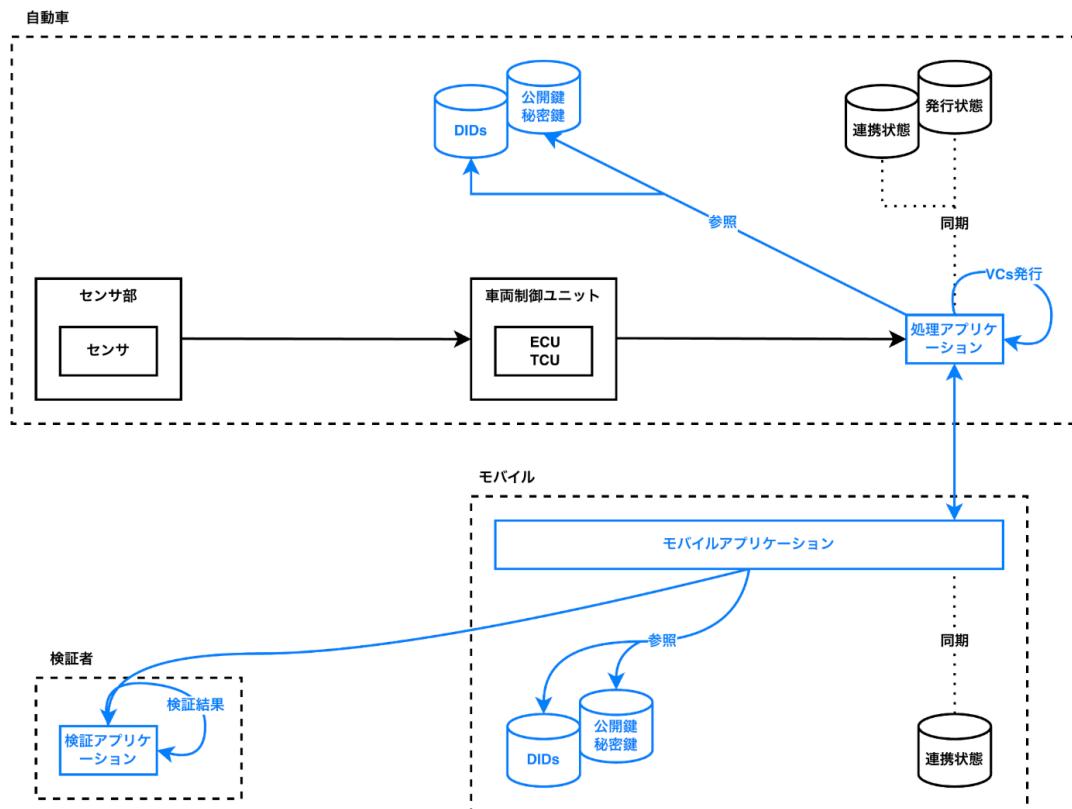


図 6.1: 概念実証の範囲

また、did:web に対応した web サイトとして、<https://did.eunos.tech/>を用いた。

6.2.2 データモデル

データモデルには、第5章で提案したように速度、加速度、回転角速度、ステアリング角度が含まれる。実際の型定義としては、以下のように定義している。

プログラム 6.1: データモデルの型定義

```

1 interface SensorData {
2   timestamp: number;           // タイムスタンプ
3   speed: number;               // km/h
4   acceleration: number;        // m/s^2
5   yawRate: number;             // rad/s
6   steeringAngle: number;       // 度 (°)
7 }
```

6.2.3 自動車アプリケーション

前述の通り、車載アプリケーションをエミュレートする形で実装している。提案手法での処理アプリケーションに該当し、以下の機能を持つ。なお、それぞれのそれぞれのコードスニペットや型定義については、付録を参照されたい。

SHA-256 ハッシュチェーンの生成 今回の実装ではサンプルデータを用いるが、サンプルデータを1秒ごとにハッシュチェーンに連結する。前提として、VCsはログではなく、主張の束である。速度、加速度、回転角速度、ステアリング角度といった自動車から取得されるこれらのデータは膨大なログであり、そのまま生でVCsに含むのは計算量的にも設計的にも不適切である。しかしながら、ログ自体の完全性を担保する必要もあるため、今回はハッシュチェーンを採用した。

データの集約 VC_sを作成するために、60秒間のデータを1つのセグメントとして扱い、それぞれのデータにつき平均値、最大値、最小値を算出する。データの完全性はハッシュチェーンの始まりと終わりをセグメントに含めることで担保する。

VCs の発行 データを集約し、セグメントごとのデータの平均値、最大値、最小値を主張としてVCsを発行する。なお、発行されるVCsは、W3C Verifiable Credentials標準に準拠した構造を持つ。

モバイルとの通信経路の確立や状態管理、VCsの失効リストの管理を行う機能は実装していない。なお、VCsの送信・受信に関しては、アプリケーション内の関数を用いることで可能となっている。

6.2.4 モバイルアプリケーション

提案手法での連携アプリケーションおよびウォレットアプリケーションに該当し、以下の機能を持つ。

VCs の受信と保存 VC_sを受け取り、データとして保存する。今回の実装では、JSONファイルを簡易的にデータの保存場所として扱っている。

VP の構成 HolderのDIDsを取得し、受け取ったVCsをもとにVPを構成する。なお、VCsと同様、VPもW3C Verifiable Presentations標準に準拠した構造を持つ。

VP の提示 構成したVPを検証者に提示する。

VP構成の状態管理、検証者との間の通信経路の確立を行う機能は実装していない。また、選択的開示についても特に実装は行っていない。

6.2.5 検証者アプリケーション

検証者アプリケーションは、実際の事業者により多様な形を取り得るが、共通する以下の機能を持つ。

VP の受信 VP を受け取り、データとして保存する。今回の実装では、JSON ファイルを簡易的にデータの保存場所として扱っている。

DIDs の解決 受け取った VP から含まれる DIDs を抜き出し、DID Document を解決する。

did:web は、DID Document を Web サーバー上にホストする DID メソッドであり、解決は did:web:<domain>:<path> といったルールに従う。今回は <https://did.eunos.tech/> を用いているため、解決先は did:web:did.eunos.tech:<path> となる。なお、解決される DIDs は VP の holder フィールドと Issuer フィールドに含まれる 2つである。

VP および含まれる VCs の検証 まず VP の構造を検証し、Holder の DIDs を解決して VP の署名を検証する。次に Issuer の DIDs を解決して VCs の署名を検証する。このようにして VP および VCs の検証を行う。

VP および含まれる VCs の失効チェック、有効期限チェックを行う機能は実装していない。

6.3 本章のまとめ

本章では、本研究の提案手法の概念実証を行なった。提案手法のコアであるデータの真正性の担保とデータに対するアクセスおよびコントロール可能性の両立を満たすシステムを実装し、その詳細を述べた。

次章では、提案システムに対する評価を行う。

第7章 評価

本章では、提案システムに対する評価について述べる。

7.1 評価内容

まず、第5章で示した要件を提案システムが満たしているかどうかを定性評価する。次に、第6章で行った概念実証を評価し、システムが実現可能かどうかを評価する。最後に、STRIDE を用いた脅威分析を行い、システムが実運用に耐えうるかどうかを評価する。

7.2 システムの定性評価

提案・設計したシステムが第5章で示した要件を満たしているかどうか、以下でそれぞれ評価する。

7.2.1 データに対するアクセスおよびコントロール可能性

データに対するアクセスおよびコントロール可能性とは、利用者が自身の自動車から抽出したデータにアクセスし、コントロールできることである。本システムでは、利用者の自動車から抽出されたデータは自動車から直接モバイルへと送信され、利用者の手元でウォレットに格納されて任意のタイミングで検証者に提示することができる。利用者はデータがどこに所在するか、そしてどのようなデータが含まれるのかを認知することができるうえ、VP という形で自身の自動車から抽出されたデータを提示できる。そのため、データに対するアクセスおよびコントロール可能性を満たしていると言える。

7.2.2 データの真正性の担保

データの真正性の担保とは、データを検証した者は誰でも、そのデータが偽造・改ざんされていないことを確認できることである。本システムでは、データは自動車で VCs へと加工され、対応する利用者のウォレットアプリケーションへ格納された後に VP として提示される。提示された VP に含まれる DIDs から DID document を解決し、公開鍵を引いて VP を確認することで、当該データが適格な自動車から利用者に渡され、検証者に提示されたことおよび偽造・改ざんされていないことを検証できる。そのため、データの真正性の担保も満たしていると言える。

7.3 概念実証の評価

第 6 章で概念実証として実装したシステムを評価する。

7.3.1 システムの実現可能性

概念実証を行った目的は、システムが要件を満たしながら実現可能かどうかを評価するためである。提案手法でコアとなる要件は、データの真正性の担保とデータに対するアクセスおよびコントロール可能性の 2 つであり、それぞれは以下のように対応している。

データの真正性の担保 今回の実装ではログの完全性を担保するためにハッシュチェーンを導入し、その上で VCs を作成することでデータの真正性を担保した。具体的に言うと、まずハッシュチェーンにより個々のデータが改ざん耐性を持つ。さらにハッシュチェーンを集約し、VCs を発行するが、VCs は発行者は誰か・改ざんされていないかどうかを検証可能であるという性質を持つ。この実装により、要件を満たす機能は実現可能であると言える。

データに対するアクセスおよびコントロール可能性 今回の実装では簡易的なデータ保存場所を持った単純なモバイルアプリケーションを実装したが、これは容易にリッチな連携アプリケーションおよびウォレットアプリケーションへと拡張可能である。モバイルアプリケーションにデータが保存されている限り、データがどこに存在しているかは容易に検証できる。この実装により、この要件を満たす機能は実現可能であると言える。

7.4 STRIDE による脅威分析

次に、STRIDE による脅威分析を行う。まず、STRIDE について整理した後にシステムのデータフローを示し、それを元に脅威を洗い出した上で評価を行う。脅威分析を行うことで、概念実証によって実現可能性を示したシステムが持つ脅威を洗い出し、実運用に耐えるかどうかを検証することを目的としている。

7.4.1 STRIDE について

STRIDE とは、Microsoft 社が提唱した脅威分析のモデリング手法であり、システムに対する脅威を 6 つに分類する [25]。脅威分析モデルを構築し脅威のリスクを調べることで、セキュリティホールの検知などに役立てることができる。STRIDE が分類する脅威のカテゴリは以下の通りである。

なお、STRIDE には、DFD（次の節で言及）に含まれる要素全てを対象として脅威を洗い出す STRIDE-per-Element と、DFD の信頼境界上の脅威を洗い出す STRIDE-per-Interaction が存在するが、本稿では STRIDE-per-Element を採用する。

表 7.1: STRIDE における脅威のカテゴリ

カテゴリ	説明
Spoofing (なりすまし)	第三者が正規の主体を装う
Tampering (改ざん)	データやシステムの偽造
Repudiation (否認)	主体による行為の否定
Information Disclosure (情報漏えい)	機密情報の不正な流出
Denial of Service (サービス妨害)	正当な利用者がシステムを利用できない
Elevation of Privilege (権限昇格)	不正に上位の権限が取得される

7.4.2 システムの DFD

STRIDE における脅威分析においては、まず対象システムの DFD(Data Flow Diagram)、すなわちデータフロー図を作成する。DFD はシステムの構成要素や機能、そしてデータの流れを示した図であり、データストア、プロセス、外部の主体、データフローという 4 種類の要素から構成される。各要素は信頼できる要素ごとにグループ化され、信頼境界という境界線で区切られる。なお、信頼境界は DFD においては点線で表現される。本システムにおいては、信頼境界は 3 つに分かれ、それぞれ自動車、モバイル、検証者である。また、STRIDE においては、脅威カテゴリと DFD の各要素との対応関係が定義されており、これに基づき各要素に対して検討すべき脅威カテゴリが決定される。本システムの DFD は下図のようになる。

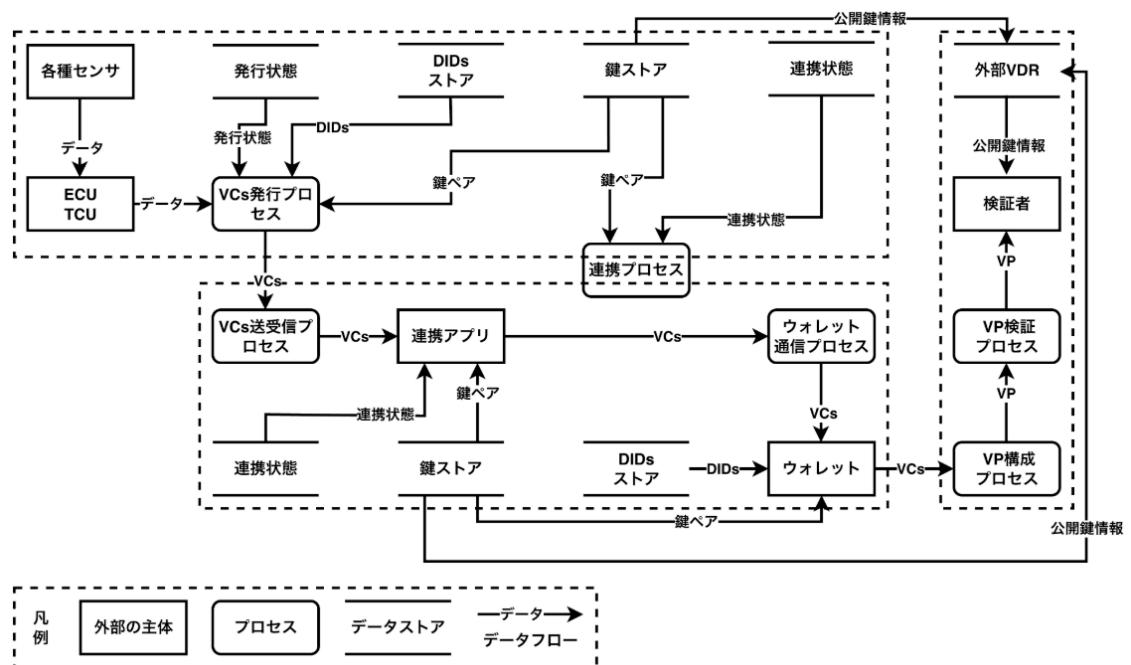


図 7.1: 提案するシステムのデータフロー図

7.4.3 特定された脅威と対処

本システムでは、自動車、モバイル、検証者のそれぞれが信頼境界を形成している。DFDを元に、それぞれの信頼境界内の各要素について脅威分析を行い、さらにその対処について検討した。脅威分析で特定された脅威は多くあるが、本研究の適用の範囲外のものも存在するため、より重要な脅威に絞って取り上げる。なお、脅威分析の結果の詳細は付録Aの「STRIDEによる脅威分析の結果」に掲載したので参照されたい。

7.4.4 自動車における脅威

VCs発行プロセス VC_s発行プロセスが改ざんされて不正に行われたり、正当な利用者になりました第三者がVC_sの発行を受けることを試みるような脅威である。この脅威により、VC_sの正当性が意味をなさなくなったり、利用者を検証者が疑う必要などが出てきてしまう。

対策としては、VC_sを発行するプロセスを耐タンパ性のあるセキュアな領域で実施する、利用者の認証を適格に行うなどが考えられる。なお、利用者の認証に関しては、超広帯域通信（UWB: Ultra-Wide Band）および低消費電力通信（BLE: Bluetooth Low Energy）を活用した研究などがなされている [26]。

連携プロセス 連携プロセスが改ざんされて不正に行われたり、正当な利用者になりました第三者が連携をしようとしたりする脅威である。この脅威により、発行されたVC_sが悪意ある第三者のもとに流れる可能性が生じ、さらに悪意ある第三者が正当な利用者のふりをして検証者にVPを提示することなどにつながってしまう。

対策としては、利用者の認証を適格に行うことが考えられる。

公開鍵情報 公開鍵情報が外部VDRに格納されるまでの間に改ざんされる脅威である。この脅威により、検証者がVPを正当な手順で検証できないという問題が発生しうる。

対策としては、安全が確立された通信経路を用いる、あるいは対処療法的に、検証者はVPを検証する前に取得した公開鍵の正当性を一回検証する、などが考えられる。

7.4.5 モバイルにおける脅威

VCs送受信プロセス VC_s送受信プロセスが改ざんされて不正に行われたり、正当なウォレットアプリケーションになりましたアプリケーションを操作する第三者がVC_sの受信を受けたることを試みるような脅威である。この脅威により、正しくVPを構成できなくなるという問題が発生しうる。

対策としては、連携アプリケーションとウォレットアプリケーションの連携を適格に行い、怪しい、認証していないようなアプリケーションと接続をしないようにすることなどが考えられる。

連携プロセス 自動車と同様の問題がモバイルでも発生しうる。

公開鍵情報 自動車と同様の問題がモバイルでも発生しうる。

7.4.6 検証者における脅威

検証者 外部の主体である検証者に、悪意ある第三者がなりすます脅威である。この脅威により、利用者と検証者が VP を提示・検証することで達成したい目的を達成できないという問題が発生しうる。

対策としては、検証前に検証者の認証を利用者が適格に行えるような仕組みを作成することなどが考えられる。

7.5 本章のまとめ

本章では、提案システムを評価した。まず、第5章で示した要件をシステムが満たしているかの定性評価を行なった。次に、第6章で行なった概念実証としての実装を振り返り、システムの実現可能性が十分高いことを確認した。さらに、STRIDEによる脅威分析を行い、システムが持ちうる脅威を洗い出し、その対処可能性について述べた。

次章では、本研究のまとめと課題、そして展望を示す。

第8章 結論

本章では、本研究のまとめと今後の課題を示す。

8.1 本研究のまとめ

本研究では、コネクティッドカーから抽出される運転歴データを対象とし、利用者自身がデータに対するアクセスおよびコントロール可能性を持ちながらも、その真正性を担保した形で第三者に提示可能とするモデルの構築を行なった。従来のコネクティッドカーに関連する様々なサービスでは、自動車メーカーや特定の事業者に車両データが送られ、管理される構造が一般的であり、利用者は自身の運転データを自由に持ち出したり、異なるサービス間で再利用したりすることが困難であった。一方で、データの真正性を担保するためには事業者の管理下にデータを置かざるを得ず、結果としてデータ構造のサイロ化やベンダーロックインが生じていた。これらの課題に対し、本研究ではDIDsおよびVCsを用いることで、利用者を論理的にデータの流れの中心に位置させる新たな手法を提案した。提案手法では、自動車が生成する運転データをもとにVCsを発行し、利用者がウォレットアプリケーションにこれを保持・提示する構成とすることで、データのコントロール可能性と真正性の両立を行なった。さらに、提案手法に基づくシステムの設計を行い、自動車アプリケーション、モバイルアプリケーション、検証者アプリケーションから構成されるシステムを概念実証として実装した。評価では、提案システムがデータの改ざん検知や発行元の検証を可能としつつ、利用者主体での運転歴データ提示を実現できることを確認した。また、STRIDEによる脅威分析を通じて、想定される脅威とその影響が及ぼす範囲を整理し、提案システムが一定のセキュリティ要件を満たし得ることも示した。結果として、本研究では、コネクティッドカーにおける運転歴データの管理・提示に関して、利用者を中心として手法を提案し、その実現可能性を示した。

8.2 本研究の課題と限界

一方で、本研究にはいくつかの課題および限界が存在する。第一に、本研究で実装したシステムは概念実証を目的としたものであり、実際の実運用を前提とした場合の性能の評価及び検証は十分に行えていない。実際の実用環境においては、コネクティッドカーから抽出される膨大なデータの処理や、多数の事業者・利用者・検証者が同時に関与する状況が想定されるため、処理負荷や通信遅延に関する評価が今後の課題となる。第二に、データの真正性は暗号学的手法により担保されるものの、自動車側で生成されるデータ自体

の信頼性、すなわちセンサの故障や不正な改変をどこまで防げるかについては、本研究のスコープ外であり、完全な解決には至っていない。車載システムの耐タンパ性やハードウェアセキュリティとの連携は、今後検討すべき重要な課題である。第三に、Verifiable Credentials および Decentralized Identifiers を前提としたエコシステムは、現時点では発展途上であり、標準仕様や実装の成熟度、事業者間の相互運用性といった点に課題が残る。特に、自動車メーカーや保険会社、カーシェアリング事業者など、多様な主体が参加するためには、技術的側面だけでなく、制度面や運用ルールの整理も不可欠である。今後の展望としては、実運用を想定した評価の実施に加え、選択的開示機能の高度化や、他分野との連携による応用可能性の検討が挙げられる。これにより、運転歴データに限らず、モビリティ分野全体における利用者主導のデータ活用基盤へと発展させることが期待される。

謝辞

まず、本論文を執筆するにあたりご指導いただいた楠本・高汐・バンミーター・植原・三次・中澤・大越合同研究プロジェクト（RG）の教員の方々に感謝申し上げます。特に、慶應義塾大学政策・メディア研究科特任教授 鈴木茂哉博士、同研究科特任助教 阿部涼介博士、そして政策・メディア研究科特任講師 Thamrin Achmad Husni 博士には多大なご指導をいただきました。知識や考え方を学べたのみならず、人間的薰陶も受けることができたこの数年間の経験は、一生使える財産になったことは間違ひありません。改めて、深く感謝申し上げます。

また、Delight の皆様に感謝申し上げます。Delight という場所で皆様とともに学び合い、議論し、成長しあえたことを幸せに思います。僕よりもはるかに優秀な人たちに囲まれて切磋琢磨できたことは幸運でした。

同様に、RG の先輩方、同期、そして後輩に感謝申し上げます。研究や興味分野に関係なく、さまざまな人たちと関わる貴重な機会を得ることができました。

家族にも感謝申し上げます。生まれて、大きな怪我や病気もなく、のびのびと好きなことをして、幸せで生きていられるのは二人のおかげです。いつもありがとうございます。これからも頑張ります。

友人たちにも感謝申し上げます。僕が楽しく学生生活を送れたのは素敵な友人たちに恵まれたからです。どんな時も、会えば笑顔になれる友人たちを持ったことを誇りに思います。

その他の、お世話になった人たちへ。到底書き切れませんが、ここまでありがとうございました。

最後に、僕にコンピュータの世界を見てくれた collodi へ。本当に、ありがとうございます。

付録A 付録

A.1 実装のコードスニペット

以下は実装のコードスニペットである。

プログラム A.1: ハッシュチェーンの生成アルゴリズム

```
1 hash_i = SHA256(
2     prevHash (32 bytes) ||
3     timestamp (8 bytes, big-endian double) ||
4     speed (8 bytes, big-endian double) ||
5     acceleration (8 bytes, big-endian double) ||
6     yawRate (8 bytes, big-endian double) ||
7     steeringAngle (8 bytes, big-endian double)
8 )
```

プログラム A.2: セグメントの型定義

```
1 interface Segment {
2     segmentStartTime: string;           // タイムスタンプ
3     durationSec: number;
4     aggregatedMetrics: {
5         speed: { avg, max, min },
6         acceleration: { avg, max, min },
7         yawRate: { avg, max, min },
8         steeringAngle: { avg, max, min }
9     };
10    hashChain: {
11        start: string;   // セグメントの最初のハッシュ
12        end: string;    // セグメントの最後のハッシュ
13    };
14 }
```

プログラム A.3: 発行される VCs の型定義

```
1 interface DrivingEvaluationCredential {
2     id?: string;
3     "@context": string[];
```

```

4     type: string[];
5     issuer: string;                      // 発行者のDIDs
6     issuanceDate: string;
7     credentialSubject: {
8         id?: string;                     // 被発行者のDIDs
9         segmentStartTime: string;
10        durationSec: number;
11        aggregatedMetrics: AggregatedMetrics;
12        hashChain: HashChain;
13    };
14    proof: {
15        type: string;
16        created: string;
17        verificationMethod: string;
18        proofPurpose: string;
19        jws?: string;
20        proofValue?: string;
21    };
22}

```

プログラム A.4: 発行される VP の型定義

```

1 interface VerifiablePresentation {
2     "@context": string[];
3     type: string[];
4     holder: string;                      // HolderのDIDs
5     verifiableCredential: DrivingEvaluationCredential[];
6     proof: {
7         type: string;
8         created: string;
9         verificationMethod: string;
10        proofPurpose: string;
11        jws?: string;
12        proofValue?: string;
13    };
14}

```

A.2 STRIDEによる脅威分析の結果

第7章でSTRIDEによる脅威分析を行った。以下はその結果を信頼境界ごとに示した表である。なお、各脅威の番号は便宜上振り分けたものであり、別段の意味はない。

表 A.1: 自動車における脅威

番号	要素	要素の種類	脅威のカテゴリ	脅威の概要
1	VCs 発行状態	データストア	改ざん	VCs の発行状態が改ざんされる
2	DIDs ストア	データストア	改ざん	DIDs が改ざんされる
3	鍵ストア	データストア	改ざん	鍵情報が改ざんされる
4	連携状態	データストア	改ざん	モバイルとの連携状態が改ざんされる
5	VCs 発行プロセス	プロセス	なりすまし	第三者が VC s の発行を受ける
6	連携プロセス	プロセス	なりすまし	第三者が連携を試みてくる
7	VCs 発行プロセス	プロセス	改ざん	VCs の発行プロセスが不正に行われる
8	連携プロセス	プロセス	改ざん	モバイルとの連携プロセスが不正に行われる
9	DIDs	データフロー	改ざん	DIDs が改ざんされる
10	鍵ペア	データフロー	改ざん	鍵情報が改ざんされる
11	発行状態	データフロー	改ざん	発行状態が改竄される
12	連携状態	データフロー	改ざん	連携状態が改ざんされる
13	公開鍵情報	データフロー	改ざん	公開鍵情報が改ざんされる

表 A.2: モバイルにおける脅威

番号	要素	要素の種類	脅威のカテゴリ	脅威の概要
1	連携状態	データストア	改ざん	自動車との連携状態が改ざんされる
2	DIDs ストア	データストア	改ざん	DIDs が改ざんされる
3	鍵ストア	データストア	改ざん	鍵情報が改ざんされる
4	VCs 送受信プロセス	プロセス	なりすまし	第三者が VCs の受信を受ける
5	連携プロセス	プロセス	なりすまし	第三者が連携を試みてくる
6	VCs 発行プロセス	プロセス	改ざん	VCs の発行プロセスが不正に行われる
7	連携プロセス	プロセス	改ざん	モバイルとの連携プロセスが不正に行われる
8	連携アプリ	外部の主体	改ざん	連携アプリケーションが改ざんされる
9	ウォレット	外部の主体	改ざん	ウォレットアプリケーションが改ざんされる
10	DIDs	データフロー	改ざん	DIDs が改ざんされる
11	鍵ペア	データフロー	改ざん	鍵情報が改ざんされる
12	VCs	データフロー	改ざん	VCs が改竄される
13	連携状態	データフロー	改ざん	連携状態が改ざんされる
14	公開鍵情報	データフロー	改ざん	公開鍵情報が改ざんされる

表 A.3: 検証者における脅威

番号	要素	要素の種類	脅威のカテゴリ	脅威の概要
1	外部 VDR	データストア	改ざん	自動車や利用者の公開鍵情報が改ざんされる
2	検証者	外部の主体	なりすまし	第三者が検証者になります
3	鍵ストア	データストア	改ざん	鍵情報が改ざんされる
4	VP 構成プロセス	プロセス	改ざん	悪意ある形で VP を発行する
5	VP	データフロー	改ざん	VP が改竄される
6	公開鍵情報	データフロー	改ざん	公開鍵情報が改ざんされる

参考文献

- [1] 雅明 佐藤. インターネット上の自動車情報基盤の構築. 博士論文, 慶應義塾大学 大学院 政策・メディア研究科, 神奈川県 横浜市, 2009.
- [2] ISO. Road vehicles — Software update engineering. Standard ISO 24089:2023, International Organization for Standardization, Geneva, CH, 2023.
- [3] 株式会社富士経済. コネクテッドカー・v2x・自動運転関連市場の将来展望 2021. 調査レポート 162105862, 富士経済, October 2021.
- [4] Gareth Mott and Inga Kroener. Six parts of your car that gather data on you. <https://theconversation.com/six-parts-of-your-car-that-gather-data-on-you-198096>, January 2023. Accessed: 2024-05-22.
- [5] Fitch Ratings. U.s. auto insurer strong performance recovery to continue through 2025. Research report, Fitch Ratings, August 2024.
- [6] MarketsandMarkets. Usage-based insurance market for automotive by package type, technology type (obd-ii, blackbox, smartphone, embedded, and other technologies), vehicle type, vehicle age, device offering, electric & hybrid vehicles, and region - global forecast to 2027. Market Research Report MAM1893, Research Station (Distributor) / MarketsandMarkets (Authoring), February 2020.
- [7] Tim Bray. The javascript object notation (json) data interchange format. Technical Report RFC 8259, IETF, 2017.
- [8] Carsten Bormann and Paul Hoffman. Concise binary object representation (cbor). Technical Report RFC 8949, IETF, 2020.
- [9] Satoshi Nakamoto. Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system. Technical report, Bitcoin.org, 2008.
- [10] National Institute of Standards and Technology. Fips 186-5: Digital signature standard (dss). Technical report, U.S. Department of Commerce, February 2023. Specifies RSA, DSA, and ECDSA algorithms.

- [11] W3C. Verifiable credentials data model v2.0. Technical report, World Wide Web Consortium, 2025.
- [12] W3C. Decentralized identifiers (dids) v1.1. W3c working draft, World Wide Web Consortium, January 2025. Available at <https://www.w3.org/TR/did-1.1/>.
- [13] ISO. Iso/iec 18013-5:2021 personal identification — iso-compliant driving licence — part 5: Mobile driving licence (mdl) application. Standard, International Organization for Standardization, September 2021.
- [14] IETF OAuth Working Group. Sd-jwt-based verifiable credentials. Technical report, IETF, 2024.
- [15] W3C Credentials Community Group. *did:web Method Specification*, 2024. W3C Community Group Draft Report. Accessed: 2025-12-23.
- [16] W3C Credentials Community Group. *The did:key Method v0.7*, 2023. W3C Community Group Draft Report. Accessed: 2025-12-23.
- [17] Decentralized Identity Foundation. Ion - identity overlay network, 2025. GitHub Repository. Sidetree-based DID network implementation.
- [18] Š. B. Ramić et al. Selective disclosure in digital credentials: A review. *ICT Express*, 10(4):916–934, 2024.
- [19] Daniel Fett, Kenji Yasuda, and Brian Campbell. Selective disclosure for json web tokens. Technical Report RFC 9901, IETF, 2025.
- [20] Michael Grieves et al. What is a (digital) identity wallet? a systematic literature review. In *2022 IEEE 46th Annual Computers, Software, and Applications Conference (COMPSAC)*, pages 1176–1181, 2022.
- [21] Iso 39001:2012 — road traffic safety (rts) management systems — requirements with guidance for use, 2012.
- [22] Iso 22837:2021 — intelligent transport systems — probe data services, 2021.
- [23] Iso 21994:2020 — intelligent transport systems — evaluation method for collision risk estimation, 2020.
- [24] Iso 21995:2020 — intelligent transport systems — evaluation method for driving behavior information, 2020.
- [25] Microsoft. Microsoft threat modeling tool の概要, 2024. Accessed: 2024-03-20.

- [26] 九州大学. モバイル運転免許証、uwb/bleでまだ見ぬ「クルマウォレット連携」の世界へ～九州大学でモバイル運転免許証時代の新たなユースケースの開発・検証を実施～. プレスリリース, 福岡, March 2025. 九州大学大学院システム情報科学研究院
荒川・峯・福嶋研究室とトヨタ・コニック・アルファ株式会社による共同実証.