

デジタルツインに向けたデータ共有のためのブロックチェーンの性能評価

高橋 圭介[†] 中里 秀則^{††} 金井 謙治^{††}

[†] 早稲田大学基幹理工学部 〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1

^{††} 早稲田大学理工学術院総合研究所 〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1

E-mail: [†]saru56suke.nb1@akane.waseda.jp, ^{††}nakazato@waseda.jp, ^{†††}k.kanai@aoni.waseda.jp

あらまし 現在、人々の Quality of Life (QoL) を高めるデジタルツイン実現に向けた取り組みが行われている。デジタルツインを実現するためには、IoT デバイスでセンシングしたデータを、アプリケーション提供者間で共有することが必要となる。このような背景に対して、ブロックチェーンの活用が期待されている。しかし、ブロックチェーンをIoT やスマートシティ領域にて活用するためには、データ量の大きさや高頻度で発生するトランザクションの場合において、スケーラビリティの問題がある。本稿では、データ共有システムへのブロックチェーンの適用可能性について、ブロックチェーンの一つである Hyperledger Fabric を用いて、画像や3次元点群データを取引する際の性能評価を行う。

キーワード デジタルツイン、データ共有システム、ブロックチェーン

Performance evaluations of blockchain for data sharing towards digital twins

KEISUKE TAKAHASHI[†], HIDENORI NAKAZATO^{††}, and KENJI KANAI^{††}

[†] School of Fundamental Science and Engineering, Waseda University 3-4-1 Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo, 169-8555 Japan

^{††} Waseda Research Institute for Science and Engineering 3-4-1 Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo, 169-8555 Japan
E-mail: [†]saru56suke.nb1@akane.waseda.jp, ^{††}nakazato@waseda.jp, ^{†††}k.kanai@aoni.waseda.jp

Abstract Many researchers are working toward realization of digital twins in order to enhance quality of life (QoL) of people. Sharing sensing data among application providers is necessary to make good use digital twins. Blockchain is expected to be adopted to share the sensing data. However, in order to adopt blockchain to Internet of Things (IoT) and smart city domains, it is said that the blockchain has a scalability issue in case of exchanging large amounts of data and highly variable data. In this paper, in order to measure the baseline performance of blockchain, we use Hyperledger Fabric, one of the blockchain technologies, and evaluate usability of Hyperledger Fabric for sharing and exchanging images and 3D point clouds.

Key words Digital twin, Data sharing system, Blockchain

1. 背景

近年、人々の QoL (Quality of Life) を向上させるサービスの開発を促進するため、現実空間をリアルタイムで仮想空間に再現するデジタルツインを利用した取り組みが注目を浴びている。例えば、東京都では、デジタルツインにより、少子高齢化・人口減少、人流・物流の変化、気候変動の危機、地震に備え、人々の QoL を向上させるデジタルツイン実現プロジェクトを行なっている [1]。デジタルツインを実現するためには、IoT (Internet of Things)、5G/Beyond 5G、信頼とセ

キュリティなど、さまざまな最先端の ICT (Information and Communication Technology) 技術が必要となる。特に、デジタルツインの早期実現と持続可能なスマートシティ/スーパーシティを構築するためには、著者らは、データ提供者とサービス/アプリケーション提供者を分離し、市民一人ひとりがセンシングに参加し、データ提供者の役割を担うことが重要と考える。このように、市民が参加型センシングを行い、様々なサービス/アプリケーション提供者とセンシングデータの共有を行うことによって、サービス/アプリケーション提供者は、センシング端末を新たに設置するコストを削減しつつ、スマートシ

ティ/スーパーシティの様々な場所からのリアルタイムなデータ収集を可能にすることが期待できる。

以上の背景から、近年、スマートシティのための「トラストフリー」な分散型データ交換・共有システムを構築するために、ブロックチェーンや分散型台帳技術が注目を集めている。ブロックチェーンは、分散型のデータ管理システムを提供し、複数の参加者で登録されているデータを検証することで、登録されているデータに対して耐改ざん性を保証することが可能となる。しかし、ブロックチェーンは、分散台帳からのデータ参照、台帳へのデータの書き込みといった取引情報に対する検証、承認するプロセスにおいて、処理の負荷が大きい。そのため、スマートシティ/スーパーシティの環境下において、大容量のデータや高頻度のトランザクションを扱う際のスケーラビリティに問題がある。

広く利用されているブロックチェーンの一つとして、IBMによって提案実装されている Hyperledger Fabric がある。このブロックチェーンの性能分析について、多くの研究が報告されている。例えば、[2] では、Hyperledger Fabric v0.6 と v1.0 の性能分析を行い、Hyperledger Fabric v1.0 は高いワークロードのシナリオで許容できる性能を提供すると結論付けている。同様に、[3] では、異なるワークロード・セットのもとで、Hyperledger Fabric v1.0 のスループットとレイテンシーの特性を評価している。さらに、[4] では、遅延の影響を受けやすい IoT アプリケーションのために CATP-Fabric を提案している。これらの研究に触発され、本稿では、Hyperledger Fabric v2.2.2 を用いてブロックチェーンベースのデータ共有システムを構築し、画像や 3D オブジェクト（3 次元点群データ）などの様々なセンシングデータを用いて、以下の二つのユースケースの下、システム性能を評価する。

- 人の属性情報や IoT データをデータ共有システムへ登録するユースケース
- データ共有システムに登録されている IoT データを活用するユースケース

なお、本稿は、筆者らが [5] にて発表を行った内容に対して、再度内容をまとめるとともに、新たにユースケースの説明や追加の実験を行い、[5] の内容を拡張させたものである。

2. 関連技術および関連研究

2.1 Hyperledger Fabric

ブロックチェーン技術は許可型 (Permissioned) ブロックチェーンと自由参加型 (Permissionless) ブロックチェーンの 2 種類に分類されており、Hyperledger Fabric [6], [7] は許可型ブロックチェーンに該当する。自由参加型ブロックチェーンは誰でも参加できるため、ノードの数が多く、コンセンサスアルゴリズムも複雑になっているため、コンセンサスに大きな時間がかかる [8]。一方、許可型ブロックチェーンは、特定の参加者のみが参加できるため、自由参加型に比べてコンセンサスに大きな遅延は生じにくい。

Hyperledger Fabric を構成するノードには、クライアント、ピア、オーダーの三種類がある。クライアントは「トランザ

クション」の実行を要求し、要求が認められると、トランザクションを順序決めのためにブロードキャストする。ピアは、トランザクションを実行し検証する。ピアは、台帳を管理するとともに、台帳の現在の状態を保持する World State も管理する。トランザクションはすべてのピアで実行されるわけではなく、「エンドースメントポリシー」に指定されたピア（エンドーサーピアとよばれる）でのみ実行される。オーダーはトランザクションの実行順序を決めるサービスを行うノードである。ここでトランザクションとは、実行する処理を指定するもので、パラメータ、取引の処理を定義する「チェーンコード」プログラムの識別子などを含む。またエンドースメントポリシーは、各エンドーサーピアが出す、トランザクションの実行を承認するかどうかの結論から、最終的な結論をどのように出すかを指定するものである。

Hyperledger Fabric の取引情報の承認プロセスは、トランザクションフロー [6] として定義している。Hyperledger Fabric のトランザクションフローは、実行フェーズ、オーダリングフェーズ、検証フェーズの 3 つのフェーズによって実現される。

まず、実行フェーズは、複数の組織が、それぞれ所有するピアにおいて、トランザクションを仮に実行し、クライアントが実行結果を集約して、すべての実行結果が同じ結果になることを確認し、トランザクションの内容について承認を行うフェーズである。図 1 に示すように、トランザクションの初めに、クライアントは、エンドーサーピアに transaction proposal と呼ばれるトランザクションシミュレーション依頼を送信する。エンドーサーピアは transaction proposal を受け取ると、トランザクションを仮に実行する。この実行結果に対し、署名を行ったものをエンドースメントとしてクライアントに送信する。この時、エンドースメントポリシーに従って、複数のエンドースメントを集約する。クライアントは複数のエンドースメントを比較し、トランザクションの仮実行の結果が同じであることを確認することで、トランザクションの実行結果に対して整合性を確保する。

次に、オーダリングフェーズは、クライアントから送信された複数トランザクションの順序付けを行い、そのトランザクションおよびその実行順序に係わる情報を含むブロックを作成し、ピアにブロックの送信を行うフェーズである。実行フェーズが完了すると、クライアントはエンドースメントをもとにトランザクションを作成しオーダリングサービスに送信する。オーダリングサービスは単一または複数のオーダーから構成されており、オーダリングサービスがトランザクションを受け取ると、オーダー間でコンセンサスを取りトランザクションの順序が確立する。コンセンサスが実行された後、オーダリングサービスにおけるリーダーのノードがブロックを生成し、ブロックを各ピアに送信する。

最後に、検証フェーズは、ブロックにあるトランザクションの正当性を検証し、台帳に追加を行うフェーズである。オーダリングサービスから受け取ったブロックのトランザクションのキーと台帳のキーを比較し、トランザクションの正当性を検証する。検証が終わると、台帳にブロックが追加される。

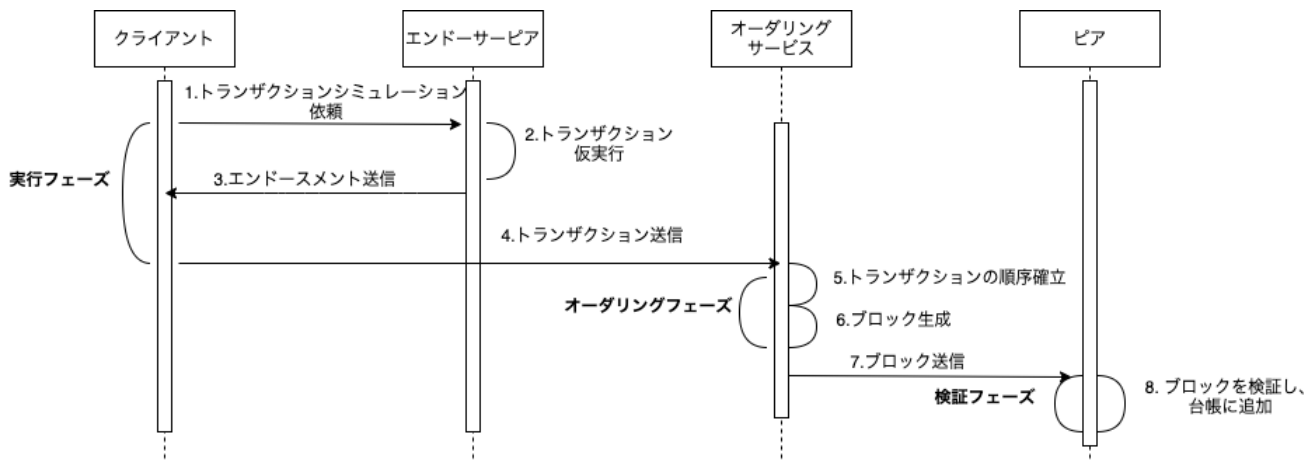


図 1 Hyperledger Fabric のトランザクションフロー

2.2 ブロックチェーンの性能評価に関する関連研究

[2] では、Hyperledger Fabric v1.0 の性能評価を行なっている。評価シナリオとして、Hyperledger Fabric v1.0 のスループットと遅延時間、ベンチマークツールを用いたトランザクションとチェーンコードのパラメータを変化させた時の遅延時間を測定し、評価している。[2] における環境下では、Hyperledger Fabric の key-value ストアの値を読み込むトランザクションの遅延時間は、1 秒間に送信するトランザクション数に対して線形になっている。key-value ストアの値を更新するトランザクション数を 1 秒あたり 1000 トランザクション数 (tx/s) よりも大きな値で送信すると、スループットが下がり、その結果、トランザクションの待機時間が大幅に大きくなっていることを示している。

[3] では、Hyperledger Fabric の二つのバージョン、v0.6 及び v1.0 についてパフォーマンスを比較している。1 秒間に送信するトランザクションの数、ピアの数を変化させた時のトランザクションの実行時間、遅延、スループットを計測して評価している。これらの評価結果から、v0.6 よりも v1.0 になることによって性能改善がみられていることを報告している。また、送信されるトランザクション数が増えた場合、両バージョンにおいてトランザクションの平均実行時間は大きくなることや、ピアの数が増えた場合、v0.6 ではトランザクションの実行時間が大きくなる一方で、v1.0 では特定の範囲内で実行時間が収まっていることを示している。

[4] では、遅延に敏感な IoT アプリケーション向けの新しいブロックチェーンシステム CATP-Fabric を提案している。IoT サービスや IoT デバイスを扱う IoT 環境下では、高頻度でデータのやりとりが行われる。これによって、トランザクションの競合が発生し、トランザクションの中止によるリソースの利用効率の劣化が挙げられる。この課題を解決するために、提案されたシステムがブロックチェーンシステム CATP-Fabric である。CATP-Fabric と Hyperledger Fabric などのブロックチェーンシステムと比較して、トランザクションの高スループットを達成することを示している。

これら先行研究では、Hyperledgr Fabric に対して画像デー

タなどの大きなデータを扱った評価までは行っていない。そこで、本稿では、先行研究よりも新しいバージョンの Hyperledger Fabric を利用し、画像データや点群データなどのより大きいサイズのデータを取り引する際の Hyperledger Fabric の応答性能について評価する。

3. データ共有システムのユースケース

本節では、ブロックチェーンの適用の動機付けとして、スマートシティにおけるデータ共有システムのユースケースについて、二つの典型例を取り上げる。具体的には、ユーザ認証時に必要となるユーザの属性情報やセンサデバイスから生成される IoT データそのものを登録する例と、システムに登録されているデータをシステムから呼び出し利用する例である。また、各ユースケースにおける必要な機能要件についてもまとめる。

3.1 ユーザの属性情報や IoT データをデータ共有システムへ登録するユースケース

本ユースケースは、図 2 に示すように、市民がユーザとしてシステムの認証を受けるために必要なユーザの属性情報や、センサデバイスから生成される IoT データを、データ共有システムに登録するというものである。

このユースケースでは、データ共有システムに登録されるデータに対して改ざんされているか否かといったデータの信頼性を担保することが重要となる。これは、悪意ある攻撃者によってユーザの属性情報が改ざんされてしまうと、本来利用権を持つユーザが正しく認証されず、システムを利用することができなくなってしまうためである。また、データ共有システムで扱われる IoT データが悪意ある攻撃者によって改ざんされてしまうと、テナント (サービス/アプリケーション提供者) が想定したサービスを正常な状態でかつ適切に利用者へ提供することが困難になる可能性がある。さらに、データ共有システムに対して不正にアクセスされ、ユーザの属性情報や IoT データが盗難される可能性もある。このように、本ユースケースでは、登録されるデータに対して改ざんなどに係わる信頼性を担保する機能がデータ共有システムには要求される。

上記のデータの信頼性を担保する上で、IoT のように高頻度

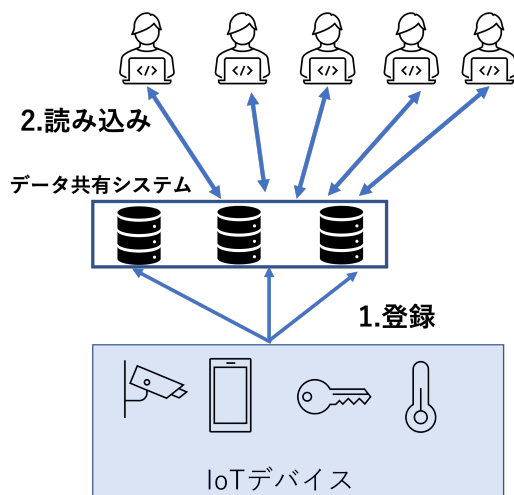


図2 データの登録および活用のユースケース

にデータ登録が要求される場合、データ共有システムのデータ登録にかかる時間、つまり応答性能も重要である。登録時のシステムスループットは、IoTのデータ登録要求レートよりも大きくなければ、登録の処理待ちが発生しバッファ溢れによる登録要求のロスも発生する恐れがある。データ共有システムの有効性を議論するためには、IoTデータ登録時のデータ共有システムが持つ限界性能を明らかにすることが求められる。

3.2 データ共有システムに登録されているIoTデータを活用するユースケース

本ユースケースでは、図3のように、テナント（ここでは、サービス/アプリケーション提供者を想定する）が、データ共有システムに登録されているIoTデータ呼び出し、自身のサービスに利用するというものである。

本ユースケースでも、前節で示したように、データ共有システムに登録されているデータの改ざんなどに係わるデータの信頼性が重要と言える。これは、先に述べたように、改ざんされたIoTデータをテナントが、改ざんされていることを把握せず無自覚に利用することで、サービス/アプリケーション提供者が想定するサービスを適切に提供することが困難になる可能性があるためである。また、データ共有システムの応答性能についても、前節で示したように、提供するサービスやアプリケーションにおける遅延要求に強く依存することとなる。つまり、サービスやアプリケーションのデータ要求レートよりも、データ共有システムのスループットが大きくなければ、サービスやアプリケーションの要求品質を達成することが困難となる。先のユースケースと同様に、データ共有システムの有効性を議論するためには、登録されているIoTデータ要求時のデータ共有システムが持つ限界性能を明らかにすることが求められる。

4. ブロックチェーンを活用したデータ共有システム

2.で概説したように、本稿で検討しているユースケースにおけるデータ共有システムの機能要件の一つとして、データに対する信頼性の保証が挙げられる。これに対応するために、近年、

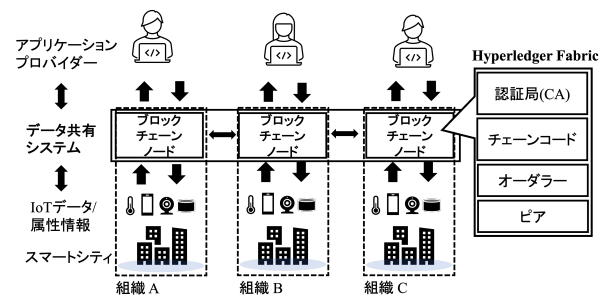


図3 登録されているIoTデータを活用するユースケース[5]

仮想通貨の分野のみならず、スマートシティなど様々な分野への応用が期待されているブロックチェーン技術を、データ共有システムへ適用することを検討する。

ブロックチェーンは、2.で述べたように、各ピアで台帳を共有しており、トランザクションの要求に対して、参加するピア間でコンセンサスプロトコルを実行し、トランザクションの検証を行う。検証後、有効とみなされたトランザクションは、ブロックとして保存される。ブロックは、これまでのトランザクション情報の全履歴を含めたチェーンの一部として管理される。最新のブロックには、その直前のブロックのハッシュ値も保有されているため、ブロックチェーンを利用することで、データの改ざんを困難にする高信頼な台帳の構築を可能にする[9]。

そこで、図3に示すように、データ共有システムとしてブロックチェーンの適用を検討する。このデータ共有システムでは、ブロックチェーンの一つであるHyperledger Fabricを適用することとし、スマートシティに参加する複数の組織それぞれがHyperledger Fabricを構成するピアをもつと仮定する。

Hyperledger Fabricを採用した理由として、2.で述べたように、Hyperledger Fabricが許可型ブロックチェーンに該当し、自由参加型ブロックチェーンと比較して、より低負荷な合意方式を採用していることからシステムの応答性能に優れていることが期待できるためである。ただし、ブロックチェーンネットワークへの参加者に対する信頼性保証は、別途検討が必要となるが、これに対しては、今後の課題とし、以降では、ネットワークへの参加者は信頼できるものと想定する。

5. ブロックチェーンを活用したデータ共有システムの性能評価

3.で述べたように、ブロックチェーンをIoTやスマートシティ領域にて活用するためには、ブロックチェーン上で取引されるデータサイズや発生頻度の増加に対するスケーラビリティに問題があると言われている。

そこで本稿では、Hyperledger Fabricをデータ共有システムとして利用した場合、3.で述べたユースケースに耐えうる十分な性能が得られるか、そのHyperledger Fabricの適用の妥当性について、まずは小規模な実機実験評価から議論する。

5.1 データ共有システムへデータを登録する場合の性能評価

Hyperledger Fabricをデータ共有システムとして利用した場

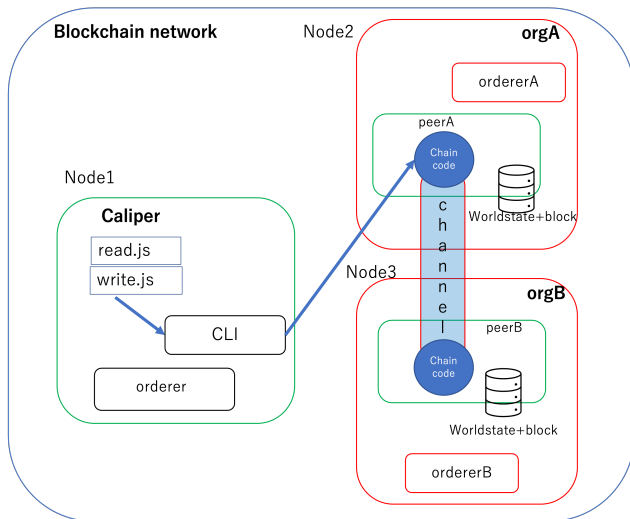


図4 本実験環境

合において、ユースケースで想定される範囲内でデータサイズを変化させ、Hyperledger Fabric の性能評価を実機実験から検証する。

5.1.1 実験環境及び実験シナリオ

本実験では、図4に示すように、Intel の小型ミニ PC (Intel NUC) を3台利用しブロックチェーンの構築を行った。図4における Node 1、Node 2、Node 3 はミニ PC を示す。ブロックチェーンネットワークの構築には、Docker Swarm を利用した。Node 1 はクライアント端末とし、Hyperledger Caliper とクライアントアプリケーションをインストールし、Node 2 および Node 3 は、Hyperledger Fabric における組織 (組織 A と組織 B) を形成しており、Hyperledger Fabric の必要な構成要素であるピアおよびオーダーラーをインストールする。ピア、オーダーラー、Hyperledger Caliper は、それぞれ Docker コンテナ上で実行した。本実験では、事前にユーザーの認証を行なっていることを想定しているため、認証局は起動せずに実験している。そのため、証明書と秘密鍵は予め持っている状態としており、トランザクションに証明書と秘密鍵をハードコーディングしている。ブロックチェーン上で取引するデータは、180B の人の属性情報 (人の名前と苗字) [10]、250KB と 419KB の PNG 画像データ、1.3MB と 3.7MB の 3 次元点群データを用いた。

ユーザの属性情報は、筆者らの先行研究である [11] で提案した IoT デバイスの認証に利用する情報の例であり、画像および 3 次元点群データは、今後デジタルツインでさらなる利活用が期待されている。特に、今回利用する 3 次元点群データは、LiDAR センサである Intel RealSense L515 [12] を利用して実際に研究室内で取得した、研究室の一部の空間データおよび椅子の 3 次元点群データである。

5.1.2 評価結果

図5は、各データサイズを Hyperledger Fabric へ登録する場合の応答時間の結果である。

図5より、データサイズが大きくなると、全体の応答時間、各フェーズ応答時間が大きくなっていることがわかる。この原因は、全体の応答時間、各フェーズの応答時間にはトランザクシ

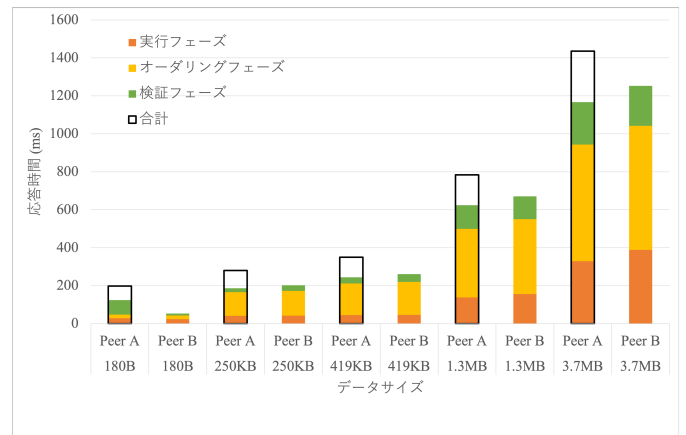


図5 Hyperledger Fabric へ登録する場合の平均応答時間 [5]

ンやブロックの伝送遅延も含んでいるためである。特にオーダーリングフェーズは、コンセンサスプロトコル実行時にオーダーラー間でトランザクションのやりとりが行われ、ブロックをピアに送信するため、伝送遅延が大きくオーダーリングフェーズの応答時間に影響すると考える。

ユーザの属性情報や IoT データを Hyperledger Fabric へ登録するユースケースにおいて、図5より、本実験環境下では 180B のユーザの属性情報を登録するトランザクションの応答時間は約 200ms となっている。そのため、もしユーザが属性情報を登録した後、認証を行う必要がある場合、大きな待ち時間は発生せずに認証することができる。また、図5より、本環境下では 1.3MB や 3.7MB のデータ (今回は、3 次元点群データ) を Hyperledger Fabric に登録する場合、それぞれ約 800 ミリ秒、約 1.4 秒の応答時間を持つ。そのため、これらのデータサイズを持つデータを扱う場合は、登録要求の頻度を抑える必要がある。一方で、デジタルツインで扱う主な点群データとして、都市の構造物や空間データといったものがあるが、これらは静的あるいは準リアルタイムなデータであることから、高頻度に登録要求が無い場合に限っては、ブロックチェーンを適用することも可能であると考えられる。

5.2 データ共有システムからデータを呼び出す場合の性能評価

5.2.1 実験環境及び実験シナリオ

本実験における実験環境は、5.1 で述べたものと同環境であるため、説明は省略する。なお、ブロックチェーンから呼び出すデータは、あらかじめ登録されているものとし、利用したデータは、5.1 と同じ 180B の人の属性情報、250KB と 419KB の PNG 画像データ、1.3MB と 3.7MB の 3 次元の点群データである。

Hyperledger Fabric からデータを呼び出す際の性能評価実験では、異なるデータサイズに対して、トランザクションの発生頻度を変化させて、Hyperledger Caliper を用いてトランザクションの平均応答時間およびスループットを測定する。本実験では、トランザクションに対してオーダーリングフェーズとバリデーションフェーズは実行されず、Hyperledger Fabric の World State から読み込む処理のみとなっている。なお、本実

表 1 データの呼び出しにおける Hyperledger Fabric のパフォーマンス [5]

Data size	Average response time (s)	Throughput (tps)
180B	0.618	549.52
250KB	0.12	147.68
419KB	0.1	99.16
1.7MB	0.17	36.56
3.7MB	0.49	12.88

験の試行回数は 5 回行い、結果はその平均値を算出した。

5.2.2 評価結果

表 1 に、各データサイズにおける Hyperledger Fabric からデータを読み出す場合の平均応答時間とスループットの結果を示す。表 1 より、Hyperledger Fabric からデータを読み出す場合は、オーダーリングフェーズとバリデーションフェーズは実行されないため、Hyperledger Fabric ヘデータを登録する場合に比べて、スケーラビリティが大きく改善されていることがわかる。また、読み出すデータサイズが大きくなるほど、スループットは小さくなっているが、これは、データが大きくなるほど World State にあるデータの検索負荷と、ピアからクライアントに結果を送信する負荷が大きくなるからだと考える。180B のデータの結果について、平均応答時間が最も大きくなっているが、これは、他のデータサイズよりも 1 秒間に送信しているトランザクション数が大きく、一時的にバッファにトランザクションが溜まり、遅延が発生したためであると推測される。

本結果から、特に、Hyperledger Fabric に登録されている点群データのようなリッチなコンテンツを取得する場合、その応答時間は約 200 500 ミリ秒となり、そのトランザクションレートは、1 秒間に 35 10 トランザクションとなる。先に述べたように、静的あるいは準リアルタイムのような点群データを扱う場合においては、本データ共有システムの公開を限定するなど、限定的な範囲内で活用する分には、Hyperledger Fabric の適用の可能性は期待できると考えられる。

6. まとめと今後の展望

本稿では、デジタルツインを実現するために必要不可欠な IoT データを非中央集権的にデータ共有を可能とする Hyperledger Fabric を活用したデータ共有システムについて検討し、2 つのユースケースの概説および、そのユースケースにおける Hyperledger Fabric の適用可能性を実機性能評価から議論した。2 つのユースケースとして、1) ユーザの属性情報や IoT データをデータ共有システムへ登録するユースケースおよび 2) データ共有システムに登録されている IoT データを活用するユースケースである。データの登録およびデータの要求の両評価シナリオにおいて、比較的データサイズの小さいユーザの属性情報からリッチなコンテンツである点群データまで、Hyperledger Fabric の応答時間について、実機評価を行った。評価結果から、リッチなコンテンツである点群データを Hyperledger Fabric で取り扱う場合、今回の実験環境では、同時接続数は限られてしまうが、現実的な応答時間で取引できることが分かった。

今後の課題は、より高性能なマシンを利用し、より大規模なブロックチェーンネットワークを構築し、引き続き Hyperledger Fabric の性能検証を行っていくとともに、データ共有システムとして実装を行い、アプリケーションまでを想定したエンドツーエンドの性能評価を行っていく予定である。

謝辞 本研究の成果は、総務省の（平成 30 年度）戦略的情報通信研究開発推進事業（国際標準獲得型）【JPJ000595】「スマートシティアプリケーションに拡張性と相互運用性をもたらす仮想 IoT-クラウド連携基盤の研究開発（Fed4IoT）」によるものである。

文 献

- [1] 東京都庁, “デジタルツイン実現プロジェクト,” [Online]. Available: https://info.tokyo-digitaltwin.metro.tokyo.lg.jp/#tokyo_3d.
- [2] A. Baliga, N. Solanki, S. Verekar, A. Pednekar, P. Kamat, and S. Chatterjee, “Performance Characterization of Hyperledger Fabric,” 2018 Crypto Valley conference on blockchain technology (CVCBT)IEEE, pp.65–74 2018.
- [3] Q. Nasir, I.A. Qasse, M. Abu Talib, and A.B. Nassif, “Performance analysis of hyperledger fabric platforms,” Security and Communication Networks, vol.2018, pp. •••••, 2018.
- [4] X. Xu, X. Wang, Z. Li, H. Yu, G. Sun, S. Maharjan, and Y. Zhang, “Mitigating Conflicting Transactions in Hyperledger Fabric Permissioned Blockchain for Delay-sensitive IoT Applications,” IEEE Internet of Things Journal, pp. •••••, 2021.
- [5] K. Takahashi, K. Kanai, and H. Nakazato, “Performance Evaluation of Blockchains Towards Sharing of Digital Twins,” IEEE LifeTech 2022 (accepted).
- [6] E. Androulaki, A. Barger, V. Bortnikov, C. Cachin, K. Christidis, A. De Caro, D. Enyeart, C. Ferris, G. Laventman, Y. Manevich, et al., “Hyperledger Fabric: A Distributed Operating System For Permissioned Blockchains,” Proceedings of the thirteenth EuroSys conference, pp.1–15, 2018.
- [7] “Hyperledger fabric,” [Online]. Available: <https://www.hyperledger.org/use/fabric>.
- [8] 佐藤竜也, 長沼健, 根本潤, 福地開帆, 山田仁志夫他, “ブロックチェーン基盤 Hyperledger Fabric の性能評価と課題整理,” 研究報告インターネットと運用技術 (IOT), vol.2017, no.30, pp.1–8, 2017.
- [9] NTT データ, “ブロックチェーンの仕組み,” [Online]. Available: <https://www.nttdata.com/jp/ja/services/blockchain/002/>.
- [10] Fed4IoT, “Deliverable4.2: Smart-city information Sharing Services - Second Release,” [Online]. Available: <https://fed4iot.org/index.php/deliverables/>.
- [11] 高橋圭介, 中里秀則, 金井謙治, 中村健一, “IoT デバイスを IoT サービス間で柔軟に共用する機構の開発,” 電子情報通信学会技術研究報告; 信学技報, vol.121, no.113, pp.80–81, 2021.
- [12] Intel RealSense, “Intel Realsense LiDAR Camera L515,” [Online]. Available: <https://www.intelrealsense.com/lidar-camera-l515/>.