

## 第9部

# SoftwareDefinedMediaコンソーシアム

SDM WGメンバー

### 第1章 はじめに

Software Defined Media (SDM) コンソーシアムは、2014年に設立され、オブジェクト指向のデジタルメディアと、インターネット環境が前提の映像・音響空間を用いたビジネス創造を目指してきた。昨年までの報告書では、SDMのコンセプトやアーキテクチャ、試作プラットフォーム[33、34]、データ収録[35]、収録データベース設計[36、37、38]、SDMプラットフォームを利用したアプリケーションであるSDM3602[39、40]やLiVRation[41、42]、Web3602[43]などを報告してきた。

本報告書では、2022年度に実施した活動を報告する。

### 第2章 デジタルツインの相互運用性向上に向けたデータ資産の包括的管理手法

#### 2.1 研究概要

近年、デジタル技術を人々の生活基盤に援用することを目的として、現実世界とデジタル世界の高度な融合による情報の利活用が目指されている。デジタルツインは、センサから取得した現実世界のあらゆる情報から、実空間全体をデジタル世界上に複製し、忠実度の高いシミュレーションをおこなう。一方で、デジタルツインはその対象の物理的・時間的・構造的複雑さを原因として、データ資産管理が課題となっている。統一的な管理手法が整っていないため、データ間の関係性が不明瞭となり、プロジェクト間の相互運用性も低下する。そこで本研究では、デジタルツインのデータ資産を包括的に管理するためのオントロジーであるDigital Twin Ontology (DTO) 及びデータ編集・加工プロセスを定式化するためのData

Conversion Ontology (DCO)を提案する。初めに、DTOでは、現実世界のエンティティの状態を柔軟に記述可能だけでなく、設計者視点に着目することで、エンティティが抽象化された仮想モデルとの相互連携を満たすフレームワークとなっている。次に、DCOでは、ある“系”から別の“系”への変換をオントロジーとして設計することで、データの編集・加工プロセスを定式化する。提案オントロジーの活用例として、オフィスを模したビル内環境に対して2種類の実装をおこなった。DTOに準拠するリンクトグラフデータセット及びクエリ結果を元に環境を再現するビューアプリケーションと、DCOに基づく座標変換システムを実装した。実装を通して、最小限の先験的知識によりデータ資産を取得可能であることを検証・考察した。また、既存手法との比較やドメインの専門家へのインタビューによる提案オントロジーの内容評価もおこない、提案手法であるDTO及びDCOの有用性を評価した。

#### 2.2 デジタルツインの課題

デジタルツインは現在の複雑システムを最適化する大きな可能性を秘めているが、モデルとデータをその中核要素とするデジタルツインにおいて、データ資産の管理に関する問題はより複雑になっている。データ管理は製品設計から資産管理・保守をおこなう既存システム上でも典型的な問題となっていることを踏まえ、本章ではデジタルツインにおけるデータ資産管理に関する現状の課題を下記の4点にまとめる。

#### Heterogeneous Data Assets

ビルシステムに向けたデジタルツインの対象エンティティは、建物、設備、什器から人、ロボット、デバイスなど物理的対象が多岐に渡る。さらに現在・過去・未来における対象のライフサイクルや状態管理を管理する

必要があるため、時間的変化への追従も要求される。また現実世界で発生した物理現象の観測だけでなく、デジタル対応物へのモデリングや継続的な更新をおこなうことから、アプリケーションを含めた構造的複雑さも存在する。

### Isolation of Digital System from Real World

物理的な異種システムや仮想的な抽象設計の複雑さを原因として、徐々にサイバー空間上のシステムが現実世界から乖離するという問題が発生する。現実世界から乖離したデジタルツインのシステムは、正確な環境状態の提示や予測が不可能となり、その意義から大きく逸脱することとなる。

### Static Description Model

多くのシステム記述仕様は、対象となる世界を固定し静的モデルとして取り扱う。デジタルツインが対象とする世界のコンテキストは絶えず動的に変化しているため、このような静的モデルを前提とした記述仕様のみではその動的変化を表現することが出来ず、現実世界からの乖離を助長する。

### Siloed Application

デジタルツインは、エンティティを表現するデータ資産のみならず、アプリケーションの実装工程で発生するデータにもメタデータを適切に付与する必要がある。例えば、センサなどの観測及びそれに基づく予測値によってエンティティの属性情報を決定するなど、観測値や状態値のデータ加工・編集・変換プロセスが想定される。これらが設計者独自の記法または手続きによって構築された場合、閉じたアプリケーションとして実装されサイロ化が発生する。リソースの先験的な知識が欠如し、データ解析やアプリケーションの拡張が困難であるため、デジタルツインの相互運用性を低減する課題となり得る。

## 2.3 提案

デジタルツインのデータ資産を包括的に管理するためのオントロジーであるDigital Twin Ontology (DTO)及びデータ編集・加工プロセスを定式化するためのData Conversion Ontology (DCO)を提案する。本研究で対象と

する環境は、屋内空間、特にビルのワンフロアや部屋のスケールとし、空間内部には、照明や空調などの設備や、什器をはじめとする静的な物理資産、人やロボットなど動的物体の存在を仮定している。また、これらのエンティティを観測するためのセンサや、インターネット経由で外部から操作・制御可能なアクチュエータ、IoTデバイスの存在を前提とする。

### 2.3.1 アーキテクチャ

提案するオントロジーのアーキテクチャについて議論する。本研究では、デジタルツインの設計対象に対する構造分析に、Geroらのsituated FBSを応用したモデルを提案する(図1)。設計プロセスを『設計者と環境の間に存在する、作ることと見ることの相互作用』とみなすsituated FBSの立場に倣い、従来アーキテクチャでは考慮されていなかった設計者視点の概念を導入する。すなわち、本提案では物理世界と仮想世界の二元論ではなく、物理世界(=外界)と、設計者が有する期待世界(=期待世界)と、データ資産として表出する仮想世界(=解釈世界)の三元論に立つ。この考えのもと提案手法のアーキテクチャでは、任意のエンティティは、その物理的な実体を高忠実度で表現する物理ツインと、設計者がエンティティに期待する状態や機能、振る舞いを有する対応物である仮想モデルの二面性を持つとして構築する。したがって、デジタルツインにおけるデータモデリングは、観測者による現実世界に存在するエンティティの定式化だけでなく、設計者の期待世界で形成されるエンティティへの解釈・知覚・概念の変換プロセスも合わせて構成される。これにより現実世界と仮想世界の間が生じていた外乱や不確か性が、同一仮想世界上で重ね合わされることで、対応すべき差異が浮き彫りになり、物理世界と期待世界の間を接続するインターフェイスとしてのデジタルツインが構成できることが期待される。以上のデジタルツインアーキテクチャをベースに、物理ツインと仮想モデルをセマンティックに統合するためのオントロジーとしてDigital Twin Ontologyを、各世界の連携に必要なデータ編集・加工プロセスを定式化するためのオントロジーとして、DataConversion Ontologyを提案する。

### 2.3.2 Digital Twin Ontology

動的な物理ツインと仮想モデルを汎用的かつ包括的に記

述するDigital Twin Ontologyを設計した(図2)。図中の各ノードはオントロジーのクラスまたはリテラルを表し、太字が名称、ノード内下部がクラスまたはリテラルの概略を記す。ノード間を結ぶ矢印の傍らに書かれているのはDataPropertyまたはObject Propertyを示す。根本側のノード、ノードから出発する矢印、矢印が指す先のノードの3つの組が、RDFのトリプルを表す。各ノード/エッジにおける語彙は、原則として提案オントロジーのベースURIである <https://sdm.hongo.wide.ad.jp/~ino/dto/>からの相対URIで示している。外部オントロジーを利用する一部のクラスのベースURIや接頭辞の情報は、RDFデータファイルを参照されたい。

提案オントロジーはOWL (Web Ontology Language)形式で設計し、36個の概念(クラス)と39個の属性(プロパティ)から構成される。前章で述べたアーキテクチャに基づき、現実世界に存在するエンティティをEntity、物理ツインをHyle、仮想モデルをEidosと呼ぶ。また、エンティティの属性値の時系列変化を表すInstance、設計者が期待するエンティティの振る舞いを表現するAffordanceを定義した。これら5つのクラスを基本クラスと定め、以下の項で詳細を述べる。

Entityクラスは、現実世界に存在する任意のエンティティを表現するクラスである。それ自体に意味を持たないが、個別具体的なエンティティの同位概念として記述されるクラスであり、その物理的側面すなわち物理ツインとしてHyleクラス、設計者により解釈及び抽象化された仮想モデルとしてEidosクラスと紐付けられる。EntityクラスのサブクラスとしてVirtualEntityクラスも定義した。これは物理的には存在しない(とみなされる)が設計者によってその存在を期待されるエンティティを表現するためのクラスであり、その個体はHyleを持たずEidosのみと結び付けられる。例として、ある機能的要件で定められた空間エリアや、1つのユニットとして扱われるグループ化された集合体などが、VirtualEntityの個体として挙げられる。なお、本オントロジーでは「物理的な存在」の形式は限定しないものとし、設計者または利用者の解釈によって柔軟な変更を認めるものとする。エンティティの物理ツインとして、Hyleクラスを定義した。HyleクラスはFBSでInterpreted worldに該当する概念として設計している。すなわち、観測者による感覚体験を通して現実世界における存在をエンティティ単位で境界づけ、デジタル世界へ忠実に投影したものとして存在する。より具体的には、Hyleの実現にデジタルツインの設計者による

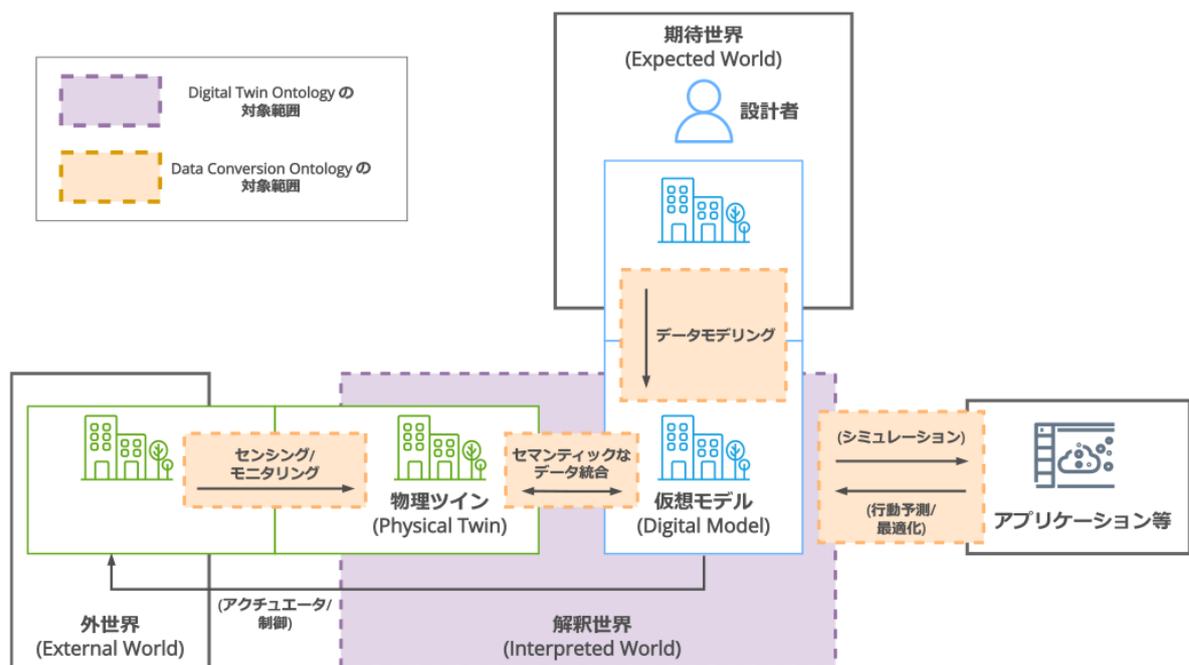


図1 Proposed architecture for the Digital Twin

期待は介入せず、エンティティの物理的側面を記述することを目的として構成・運用される。一方、エンティティの仮想モデルとして、Eidosクラスを定義した。Eidosクラスは、FBSにおけるExpected worldに該当する概念として設計している。すなわち、外界(または解釈世界)に存在するエンティティに対して、設計者が期待する抽象化概念をデジタル世界上に投影したものとして存在する。より具体的には、Eidosはデジタルツインのアプリケーションやコンテンツでの利用が想定される制御可能なエンティティの仮想モデルを記述することを目的として構成・運用される。また、HyleとEidosは属性情報を付与するための概念として定義されたPropertyクラスと関連付けられる。Propertyは後述するInstanceクラスを付随することで、時系列情報と結びついた属性値の表現をおこなう。なお、先述したHyleとEidosの設計意義に基づき、Hyleと関連付けられるPropertyは観測/測量から導き出される物理的属性情報を記述し、Eidosに関連付けられるPropertyは設計者が期待または意図した仮想的属性情報を記述する。

Instanceクラスは、Propertyの離散値や単一のAffordanceを記述するための概念である。時系列情報

を紐づけるため、時間情報をData Propertyとして持つ。属性情報の表現のためにDataクラスを定義したほか、ThingのPropertyの実数値やActionの入力値、センサの観測値のデータスキーマを記述するためのDataSchemaクラスや各パラメータ表現のParameterクラスを定義した。座標情報を記述するため、InstanceのサブクラスとしてCoordinatesInstanceクラスを定義した。直交座標系、極座標系、円筒座標系など、空間位置の指定はその座標系により数多くの表現形式を取り得ることから、リテラル値を持つDataクラスではなくPointクラスと紐づくよう設計した。

Affordanceクラスは、設計者が意図した動作や振る舞いを表現する概念である。「アフォーダンス」理論は元来アメリカの心理学者ジェームズ・ギブソンが提唱したものであり、エージェントが環境との相互作用によって知覚できる行為から与えられる情報や特性を意味する。提案オントロジーは、Web of Thingsで採用されるアフォーダンス[44]を改変し、Propertyは基本クラスとして独立させ、ActionクラスおよびEventクラスをAffordanceクラスのサブクラスとして定義した。Actionクラスは、Eidosが持つ機能もしくは特定の動作をエンティティに指示/

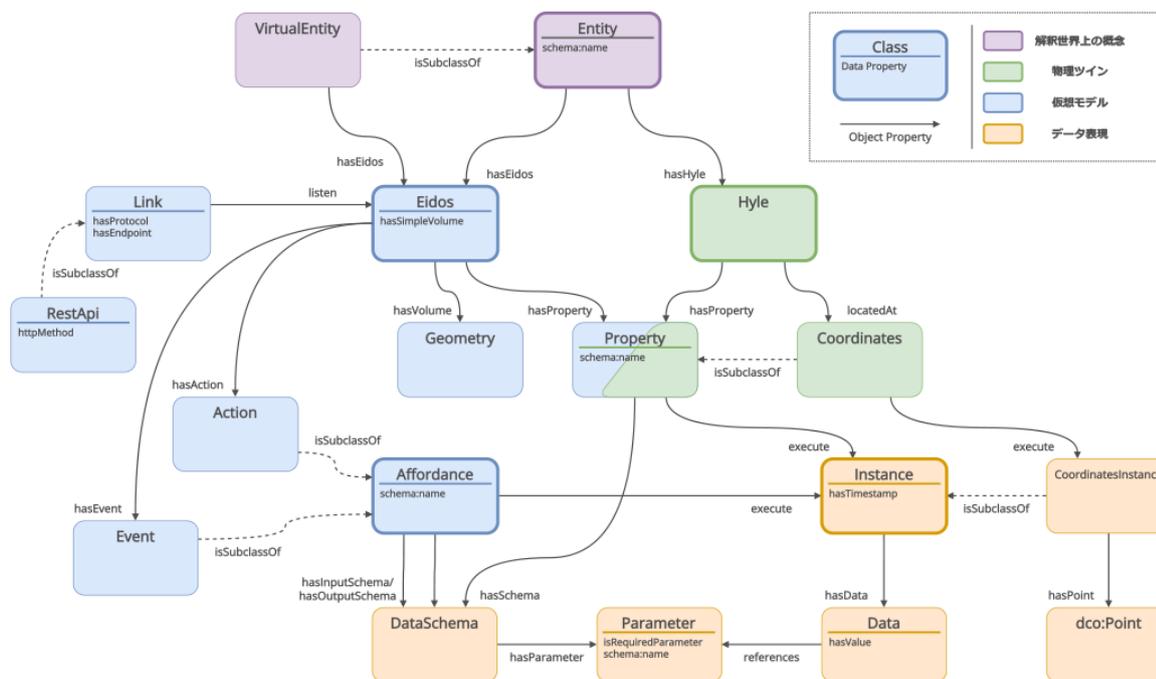


図2 Digital Twin Ontology

実行させる操作を記述し、EventクラスはEidosが自律的に実行する動作を記述する。なおAffordanceは期待世界における動作の表出であるため、HyleではなくEidosと関連付けられる。

### 2.3.3 Data Conversion Ontology

提案オントロジーを用いたデータセット制作は、以下のような手順でおこなわれることが予想される。

1. 実空間のエンティティのモデリング
2. センシングによる環境・属性情報の計測
3. データセットの分析・編集・加工
4. セマンティックに基づいたデータの整理・突合・保存

アプリケーション構築の実運用上、前処理として建物のモデルデータや環境のセンシングデータを編集・加工し、RDFリソースとして変換する工程が必要となる。先行研

究ではこの工程は考慮されていないが、第2.2章で述べた通り、本工程で発生するメタデータの管理方法が確立されていないことでサイロ化が助長され、物理空間の不確実性への対応が困難になる。あるエンティティの属性情報が複数のセンサーによって観測される場合、その物理量の予測値を表現するには単一もしくは複数の観測値を参照したデータ変換が不可欠である。そこで本研究では、オントロジー及びそのグラフデータを有限オートマトンの状態遷移図とみなすことで、データ変換・編集・加工プロセスの形式化を解決するアプローチを提案する。本研究で対象とするデータ変換は、ある"系"から別の"系"への変換とする。この時、データ変換は「系Aの元である値aを入力とし、系Bの元であるbを出力とするような関数fを持つ変換T」というように定義できる。続いて、オートマトンについて概略を述べる。有限状態集合をQ、入力の有限集合をΣ、出力の有限集合をΔ、状態遷移関数を  $\delta: Q \times \Sigma \rightarrow Q$ 、出力関数を  $\lambda: Q \times \Sigma \rightarrow \Delta$ 、そして初期状態

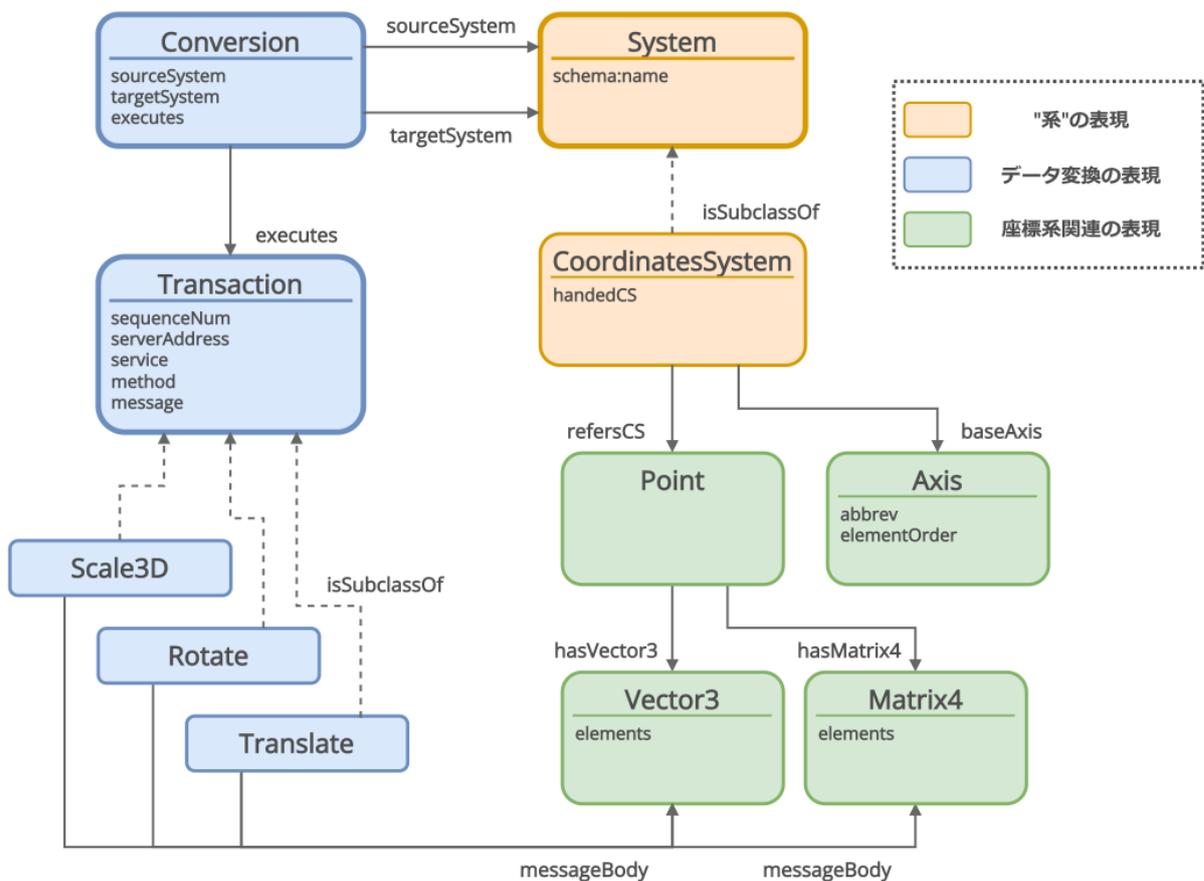


図3 データ変換プロセスを定式化するData ConversionOntologyの概要

を $q_0 \in Q$ と表記すると、Mealy型順序機械 $M$ は $M = (Q, \Sigma, \delta, \Delta, \lambda, q_0)$ と表される。これを前述のデータ変換の定義に照らし合わせると、入出力の系が $Q$ 、その元となる入出力データが $\Sigma$ と $\Delta$ 、変換の関数が $\lambda$ となるような状態遷移関数 $\delta$ として対応付けられることが分かる。このことから、データ変換を表すオントロジーが、Mealy型順序機械の状態遷移図を模した形式で表現できることが期待できる。

DCOの概要を図3に示す。単位やデータ型といった“系”をSystemクラス、データ変換(状態遷移関数)のモデルをConversionクラス、変換プロセスで実行される個々の処理(出力関数)をTransactionクラスと定義した。ConversionクラスはObject PropertyとしてsourceSystemとtargetSystemを持ち、変換前の系と変換後の系を指定する。またexecutesプロパティによって、系の変換で実行されるTransactionを指定する。本提案では、出力関数をオントロジーとして表現するために、TransactionクラスにRPC (Remote Procedure Call)を活用した。RPCは遠隔手続き呼び出しとも呼ばれ、サーバ上で実装されている関数や手続きをクライアントからの呼び出しに応じて実行する技術である。RPCを前提とすることで、一般に関数そのものを記述することが困難であるLODに対し、データ変換の手続きに必要な関数を明示可能なオントロジーを設計することでこれを解決する。TransactionクラスはData Propertyとして、関数の適用順序を指定するsequenceNumプロパティ、RPCサーバを指定するserverAddressプロパティ、RPCのサービス及びメソッドを指定するserviceプロパティとmethodプロパティ、更にメソッドの引数としてmessageプロパティを持つ。

## 2.4 実装

オントロジーの活用方法の検討や、アプリケーション制作者の視点から構造を考察する目的で、リンクトグラフデータの構築とビューアアプリケーションの実装をおこなった。

### 2.4.1 実証フィールド

本実装に先立ち、第2.3章で述べたビル管理システムの

実証環境として、オフィスを模した実験エリアを実証フィールドに選定し、データセットの収集をおこなった。

本データは、2021年4月にNTTコミュニケーションズが開設した「CROSS LAB for Smart City<sup>\*1</sup>」(以下実験エリア)で取得したものの中から、同年10月14日から12月27日までのデータを用いる。図4に示す実験エリアは床面積約300m<sup>2</sup>であり、予め建物構造がIFC(Industry Foundation Classes)形式でデータ化されている。照明器具や電気系統などの設備情報、椅子やキャビネットといった什器情報も取得し、形状構造に加え、寸法や材質、製品識別情報など、各々数KBから数MBのIFCファイルに分割された。加えて、一部の設備(空調、照明器具等)はネットワーク経由で動作を制御可能なデバイスが付帯されており、接続情報やAPI (Application Programming Interface)、通信プロトコルなどのデータも存在する。物理エンティティの代表例として、複数センサを搭載した自律走行ロボット(AGV, Automatic Guided Vehicle)を巡回させた。自律走行ロボットはその主要なデータとして座標、向き、バッテリー残量、滞在エリアを取得し、100B/s ~ 200B/sのログを出力する。また本ロボットはネットワーク経由で移動指示可能なAPIが実装されており、予め定義された屋内エリアへ自律的に移動することが可能である。

### 2.4.2 リンクトグラフデータとビューアアプリケーション

提案オントロジーに準拠したリンクトグラフデータを構築した。本シナリオにおけるデータセットは大きく建物情報と、動的エンティティを代表する自律走行車情報に



図4 Demonstration Field

\*1 <https://www.ntt.com/business/dx/smart/city/>

二分される。

はじめに、建物情報について述べる。オフィスを模した実験エリアは、建築・設備・什器要素を含めた計273個の建物部位部材要素から成り、各要素には座標情報や幾何形状情報、寸法、材質、その他製品識別情報などが付与されている。リンクトグラフデータとして構築したものの一例が図5である。各要素の属性情報及び座標情報をそれぞれProperty个体、Coordinates个体に変換し、各建物要素のEntityのHyle个体とEidosに関連づけた。座標情報は正確にはEidos个体に紐付けられるべきだが、建物要素の位置は不変なものであるという前提を置き、Hyleの属性とした。なお、本提案では実装を省略したが、dto:BuildingElementはdto:EidosかつBuilding Topology Ontologyのelementクラスのサブクラスとして定義されているため、BOTの表現力の範囲内に限られるが、IFCで定義されている各建物要素間の階層構造の記述についても拡張可能である。

続いて、自律走行車の情報について述べる。自律走行車

を表現するdto:Entity个体のrsc:agv、その物理的側面であるdto:Hyle个体のrsc:hyle\_agv及びデジタルモデルであるdto:Eidos个体のrsc:eidos\_agvを基本个体として作成した(図6)。自律走行車が搭載するセンサー(dto:Entity个体のrsc:agv-sensorで表される)の観測(dto:captures)により捕捉される属性情報としてProperty个体の座標(rsc:coordinates)、状態(rsc:status)、方向(rsc:direction)、バッテリー残量(rsc:battery)を定義した。自律走行車の属性情報のセンシング(rsc:observation)は、車載センサのEidosが実行するdto:Affordanceとして定義されている。また、移動指示制御は、rsc:eidos\_agvに付随するdto:Action(rsc:action1)にそのモデルを、dto:ActionInstanceには複数回実行された個々の動作が記述される。各ActionInstanceの个体は実行時間を持つほか、該当APIに送信された入力データである事前に登録された実験エリア内の特定ポイント情報を表すdto:Dataの个体に関連付けた。

構築したデータセットを用いて対象シナリオである屋内環境の包括的な情報が取得できることを確認するため、

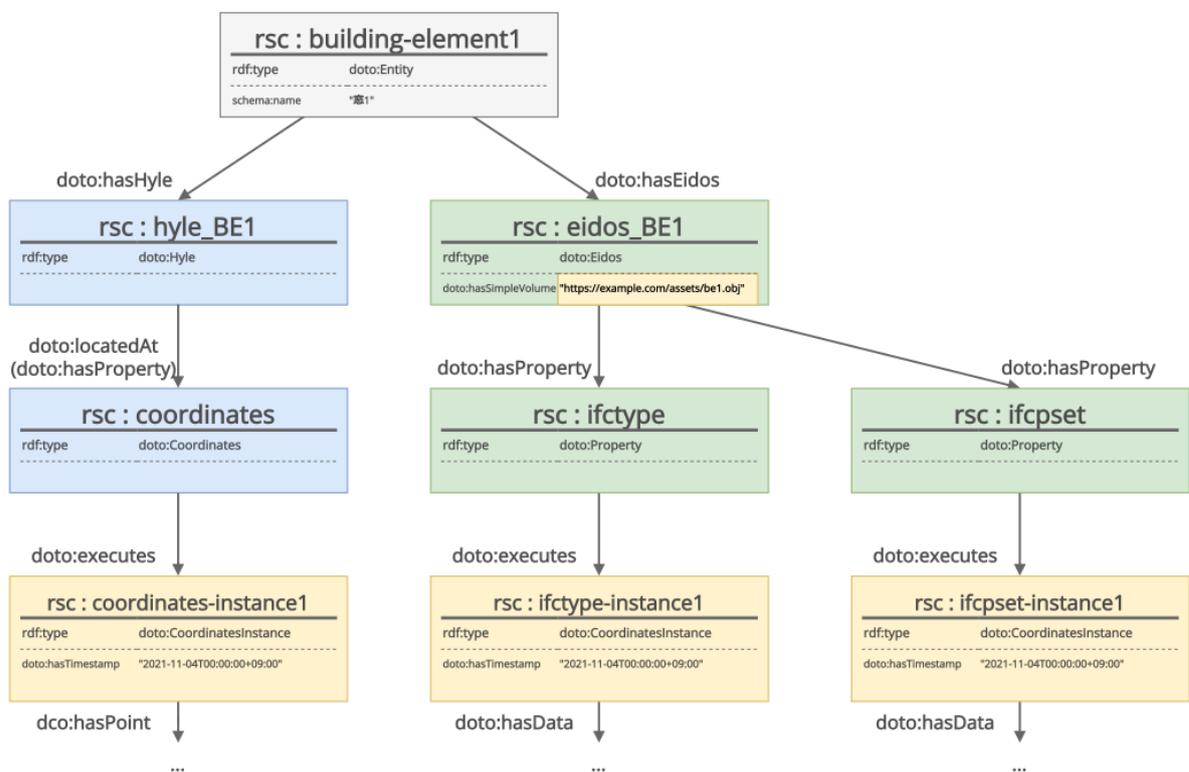


図5 建物要素を提案オントロジーに準拠したリンクトグラフとして構築した例

ビューアプリケーションの開発をおこなった。ビューアプリケーションは、各エンティティの属性情報や状態の時系列変化の取得、収録済みの屋内3Dコンテンツの自由視点操作及びレンダリングが可能なWebアプリケーションとして実装した。またアプリケーションへエンティティや環境に関する先験的なデータの事前埋め込みをすることなく、データセットへのクエリ呼び出しのみを用いてデータ提示が可能であることを目指す。

実験エリアの包括的な情報がRDFデータとして格納されているRDFストアにSPARQLクエリを発行し、アプリケーションの動作に必要なデータを取得する。現状発行するクエリは(1)環境および建物要素の座標や幾何形状などの情報取得;(2)内部物理資産の座標や幾何形状などの情報取得;(3)アフォーダンスの取得の3種類ある。

例として、対象エンティティをその名前で検索し、それに紐づく属性情報の取得をおこなうクエリを示す(リスト1)。属性情報を観測するセンサの情報も併せて検索することで、センサが発行するテレメトリデータを取得する。前者はHyleに関するクエリである。dto:locatedAtプロパティで関連付けられる座標情報の根拠である観測をdto:capturesプロパティから探索する。さらに、その観測の実行主体であるセンサをdto:sosaMadeObservation

から探索するほか、3次元ベクトルで表わされる座標成分も、DCOで定義されたプロパティを利用して取得する。後者はEidosに関するクエリである。なお、属性情

Listing 1 ある名前を持つエンティティに付帯する属性情報及びそれを観測するセンサ情報の取得

```

1 SELECT DISTINCT ?entity ?hyle ?datetime ?
  vec3_element ?sensor WHERE
2 {
3   ?entity a          dto:Entity ;
4             dto:hasName  "${name}";
5             dto:hasHyle  ?hyle ;
6             dto:hasEidos ?eidos .
7   ?hyle dto:locatedAt ?coordinates .
8   ?observation dto:captures ?coordinates ;
9             dto:executes ?coordinstances .
10  ?eidos_sensor dto:sosaMadeObservation ?
  observation .
11  ?sensor dto:hasEidos ?eidos_sensor .
12  ?coordinstances dto:hasTimestamp ?datetime;
13             dto:hasPoint   ?point .
14  ?point dco:hasVector3 ?vec .
15  ?vec dco:element ?vec3_element .
16 }
17
18 SELECT DISTINCT ?entity ?eidos ?actionName ?
  datetime ?paramName ?value WHERE
19 {
20  ?entity a          dto:Entity ;
21             dto:hasName  "${name}";
22             dto:hasEidos ?eidos .
23  ?eidos dto:hasAction ?action .
24  ?action dto:hasName ?actionName ;
25             dto:execute ?actionInstances .
26  ?actionInstances dto:hasTimestamp ?datetime
  ;
27             dto:hasData   ?data .
28  ?data dto:hasValue ?value ;
29             dto:references ?ref .
30  ?ref dto:hasName ?paramName .
31 }

```

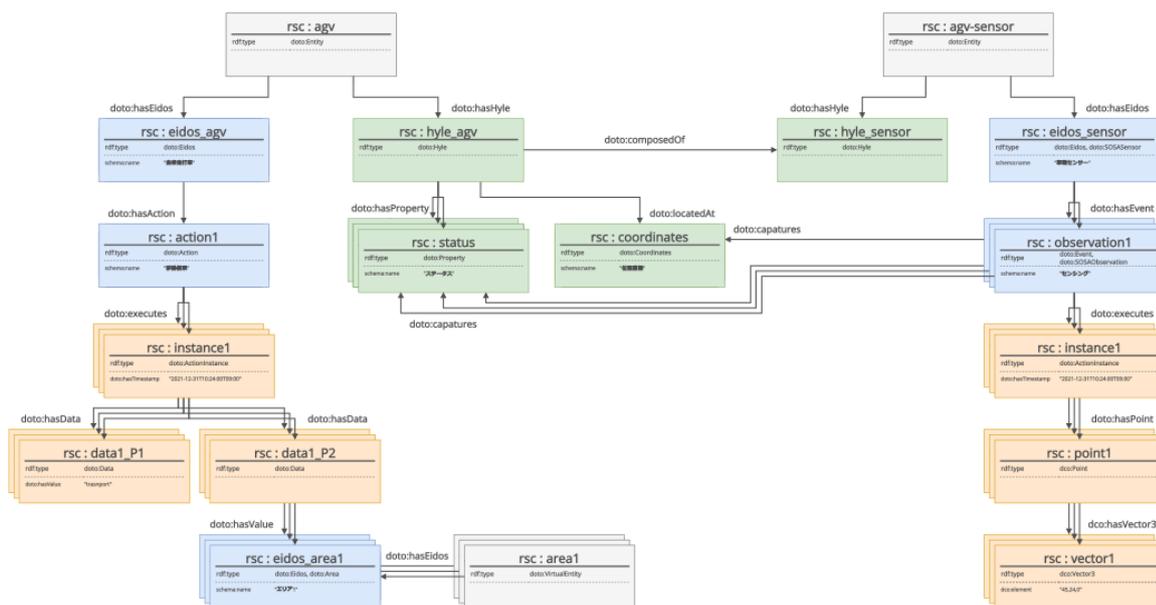


図6 自律走行車(AGV)を提案オントロジーに準拠したリンクトグラフとして構築した例

報はシナリオ2で説明したため省略する。エンティティがその仮想モデルとして機能を持つ場合、eidosからhasActionプロパティを介して取得可能である。各Actionは時系列表現としてdto:ActionInstance個体を持つため、dto:hasTimestampで時間情報、dto:hasDataに紐づくdto:Data個体から物理量や観測量を表すリテラル値が導ける。さらに、dto:Data個体は、dto:Parameterを介してdto:DataSchemaとも関連付けられており、参照するデータスキーマ情報も取得できる。

### 2.4.3 データ変換システム

DCOの利用性を向上させるため、直交直線座標系における座標変換を表現するクラスをDCOに定義した。はじめに、Systemのサブクラスとして座標系を表現するCoordinatesSystemクラスを定義した。CoordinatesSystemクラスは、軸を表すAxisクラスと関連付けるためのbaseAxisプロパティ、単位系を表すUnits of measurement ontologyのlength unitクラスと関連付けるunitプロパティ、右手/左手を指定するhandedCSプロパティを持つ。続いて、CoordinatesSystemを系とする座標点としてPointクラスを定義した。PointクラスはrefersCSプロパティにより、その系を関連づける。座標点を表す3次元ベクトルまたは4×4サイズの変換行列はVector3クラスやMatrix4クラスで定義され、それらにelementプロパティで結びつくカンマ区切りの文字列を成分表示とみなす。最後に、座標変換で基本的なアフィン変換をモデル化した。拡大縮小を表すScale3D、回転を表すRotate、並進移動を表すTranslateクラスを、それぞれTransactionのサブクラスとして定義した。各クラスは、事前に作成したgRPCサーバのアドレス、サービス、メソッドをデータプロパティとして持つ。なお、gRPCのデータフォーマットとして主流なProtocol Buffers<sup>\*2</sup>は、protoファイルによるスキーマファーストな設計を前提としている。すなわち、サーバ/クライアントともにスキーマを前提とした開発が主流であるため、本提案のように、利用するgRPCのメソッドをスキーマに従い事前に登録する実装は整合性が高いと言える。

## 2.5 評価

提案オントロジー及びビューアアプリケーションに対し、2種類の評価をおこない、得られた結果について考察する。

### 2.5.1 比較評価

既存オントロジーと提案オントロジーの比較を行い、定性評価を行った。比較対象として、デジタルツインに向けた新規オントロジーを提案したSinghらの研究[45]に加え、オントロジーや関連技術を活用したデジタルツイン研究で注目されるBIM/IFC、BOT、REC (Real Estate Core)、SSN、WoTを挙げる。BIM/IFC、BOT、RECは主に建築分野、SSN、WoTは主にセンサやIoT分野のセマンティクスである。なお、RECは2022年8月末に大幅なアップデートを含むver4が公開された<sup>\*3</sup>が、プレビュー版であるため本稿では前身のver3.3を対象とする。本研究で取り組む課題および既存オントロジーの設計思想を考慮し、定性評価の指標として6項目を適用した結果を表1に示す。提案手法を含めた7個のオントロジーを、元となる論文やドキュメント、関連するレビュー論文を参考に独自評価した。なお、表中で用いている3種類の記号の意味/役割はそれぞれ次の通りである。

- ✓: 十分に記述可能、またはそれに準ずる語彙等が定義されている。
- △: 評価不能、または該当する語彙が存在するが表現可能な範囲が十分ではない。
- ×: 表現不可能、またはそれに準ずる語彙の定義が無い。

以下、各項目ごとの評価詳細および考察を述べる。

#### 記述可能な対象領域

Singhらのオントロジーは、事物とその抽象モデルの関係性記述に特化している。BIM/IFCおよびBOTは、建築物の構造および空間を区切る要素を表すIfcBuildingElement下、床や壁、窓やドアに渡り建物要素および関連設備を正確に記述可能であるが、要素間の相互作用や動作等の記述は想定されていない。またSSNやWoTは環境情報の記述は定義されていないもの

\*2 <https://developers.google.com/protocol-buffers>

\*3 <https://github.com/RealEstateCore/rec/releases/tag/v4.0-preview>

の、センサを始めとするIoTデバイスに関して柔軟な記述が可能である。しかし、デバイスが持つ機能の記述として確立されていることから、環境情報や他オブジェクトとの相互作用の語彙は定義されておらず、汎用的なデジタルツインオントロジーとしては不足点が多い。RECは、提案オントロジーと同様に環境から内在する事物の情報までを包括的に記述することを目指していると言える。

### 物理ツインと仮想モデルの分離

Digital Twin Ontology及びSinghらの手法は、実空間の属性情報を正確に記述するクラスとオブジェクトの抽象モデルの定義を分割することで、アプリケーションやコンテンツ制作に必要な情報をエンティティへ柔軟に関連付けることを可能としている。Digital Twin Ontologyと記述対象領域が共通するRECの大きな相違点として本項が挙げられる。

### 物理ツインの記述

上記の通り、物理ツインと仮想モデルの分離をおこな

うオントロジーは提案手法とSinghらの研究のみであり、その他のオントロジーでエンティティの物理状態や属性を記述可能としているものは見られなかった。一方、Singhらが物理ツインとして定義するAssetクラスは、最小要件しか定義されておらず、その状態値や属性値の記述に関して論文中で述べられていないため、本評価では△とした。

### 仮想モデルの記述

Digital Twin Ontology及びWoTは、PropertyやAction、Event概念によって仮想モデルの属性や状態情報、機能、振る舞いを柔軟に記述することが可能である。RECは属性情報を記述するための概念こそ持たないが、汎用的にエンティティを記述するAsset概念に具体的なサブクラスを多数定義することで、必要な記述量を減らしていると考えられる。Singhらのオントロジーは、状態や機能の表現に該当すると考えられる概念を定義しているが、前述の通り具体的な記述方法が述べられていないため△とした。BIM/IFCはIfcProperty\*4によりカスタムプロパティを柔軟に記述可能である。

表1 6項目の評価指標に基づくオントロジーの定性評価

	記述対象領域			物理ツインと 仮想モデルの分離
	エンティティ	環境	その他	
提案オントロジー	任意の事物	空間および建物要素	時系列変化、抽象モデル	✓
Singh, et al. [13]	任意の事物	-	抽象モデル	✓
BIM/IFC [14]	一部設備や仕器	建物要素と階層	-	×
BOT [15]	一部設備	建物要素と階層	-	×
REC v3.3 [16]	関連システム	空間および建物要素	事物の動作	×
SSN [17]	任意のセンサデバイス	-	プロセス、動作など	×
WoT [18]	任意のIoTデバイス	-	動作、作用、プロトコルなど	×

	物理ツインの記述	仮想モデルの記述		時系列情報の記述	データ変換プロセスの記述
	現実世界の状態や属性	設計者定義の状態や属性	機能、振る舞いの記述		
提案オントロジー	✓	✓	✓	✓	✓
Singh, et al. [13]	△	△	△	✓	×
BIM/IFC [14]	×	✓	△	×	×
BOT [15]	×	△	×	×	×
REC v3.3 [16]	×	✓	✓	×	×
SSN [17]	×	×	✓	✓	×
WoT [18]	×	✓	✓	×	×

\*4 [https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4\\_3/lexical/IfcPropertySet.htm](https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4_3/lexical/IfcPropertySet.htm)

一方、汎用的な「振る舞い」を記述するための概念は定義されていない。建築資産の記述に特化しているため、機能や振る舞いはエンティティに割り当てられたクラスの暗黙的な共通理解となっていると考えられる。BOTはBIM/IFCの軽量オントロジーとして、一部表現手法が削減されているためBIM/IFCから評価を一段階ずつ落としている。SSN/SOSAはセンサデバイスの範囲内でその機能や振る舞いを記述するための概念が多数定義されている。一方で、センサ自体や観測対象として定義されるFeatureOfInterestなどの属性記述に関してはドキュメント内で述べられていない。

#### 時系列/動的データの記述

Digital Twin Ontologyはある時点における属性情報や動作の記述を目的として、Instanceクラスを導入し動的データの表現も可能とした。Singhらの手法やSSNも同様に、センサから取得したデータに時間情報を記述することで時系列情報の付与をおこなっている。BIM/IFCやBOT、またREC、WoTにはこのような時間情報の定義はなく、静的情報のみ取り扱う。

#### データ変換プロセスの記述

観測データをはじめとするテレメトリデータや各種属性値に関する処理、特に編集や加工プロセスに関する記述は、提案オントロジーを除いて見られなかった。

#### 2.5.2 ユーザ評価

オントロジーの質を保証する上で、オントロジーが対象世界を適切に記述可能か評価し、その結果を元に洗練をおこなうフェーズは重要である[46]。本研究では、オントロジーの洗練のフェーズに向けた取り組みとして、提案オントロジーのユーザを想定した被験者を対象に、表現の妥当性や拡張性などの内容評価をおこなった。

前章で述べたビューアアプリケーションとリンクトグラフデータそれぞれについて調査を実施した。本提案の利用者や開発者を想定し、オントロジー / デジタルツイン / 建築分野に関して業務での利用経験を持ち、一定のドメイン知識を持つと考えられる専門家4名を被験者とした。はじめに共通するシナリオについて説明した後、各実装の概要と操作方法について動画及びデモンストレーショ

ンを通して説明した。その後被験者に自由に操作してもらいながら、9つの設問によるアンケートと自由記述に回答する形でインタビューを進めた。

アンケートは、以下に示すQ1からQ9までの9項目から成る。それぞれ1を最低評価、7を最高評価とした7段階のリッカート尺度を用いて回答してもらった。Q1は本提案のアーキテクチャのベースとなる物理ツインと仮想モデルの概念を直感的に理解できたかを問う設問である。Q2以降の設問は、特定の項目に対してその理解度とデータの獲得度に観点から評価してもらった。Q2及びQ3はエンティティの属性情報について、Q4及びQ5はエンティティ間やデータ間の関係性について、Q6及びQ7はエンティティの時間変化について、そしてQ8及びQ9はエンティティの動作・振る舞いについて問うものとして作成した。

- Q1 実空間(Hyle)と仮想空間(Eidos)を体験できたか(概念及びその差異が直感的に理解できたか)
- Q2 (クリック先など)対象の物体が持つ属性情報を理解できたか
- Q3 (クリック先など)対象の物体が持つ属性情報が十分に得られたか
- Q4 (クリック先など)対象の物体や各データの関係性が理解できたか
- Q5 (クリック先など)対象の物体や各データの関係性の情報が十分に得られたか
- Q6 (クリック先など)対象の物体の時間変化に関する情報が理解できたか
- Q7 (クリック先など)対象の物体の時間変化に関する情報が十分に得られたか
- Q8 画面中央付近で時間変化に伴い移動する物体について、その物体がおこなう動作について理解できたか
- Q9 画面中央付近で時間変化に伴い移動する物体について、その物体がおこなう動作について十分な情報が得られたか

アンケートの結果を図7及び図8に示す。縦軸は7段階のリッカート尺度を、横軸は種類別にまとめた設問を表す。各設問は理解度または情報獲得量を問う設問であり、それぞれ青色またはオレンジ色で表す。各プロットが回答

を表し、折れ線グラフが平均評価を表す。

口頭での議論及び自由記述からの回答内容を分析し、大きく、(1)オントロジーの構成; (2)時系列データの扱い; (3)ビューアアプリケーションのUI (UserInterface); (4)物理ツインと仮想モデル; (5)オントロジーのアンケート評価;の5つに分類した。

## 2.6 議論

オントロジーの質は、ドメインの専門家による表現の妥当性や拡張性の内容評価を繰り返すことにより保証されることから、世間への周知や導入コストの低下などオントロジーの普及活動は非常に重要だと言える。したがって本節では、提案手法に関する2種類の評価を踏まえ、オントロジーの普及の観点から提案手法の課題や改善点を考察する。

はじめに、時系列情報の提示について述べる。Digital Twin Ontologyでは、時系列情報を記述するために Instanceクラスを定義した。単一かつ離散的なエンティ

ティの動作を表現しながら他の概念と意味的統合をおこなうために、オントロジーのクラスとして定義し、個体をRDFデータ形式で作成した。一方で、ユーザ評価でも指摘された通り、この手法は、(1)多くの先行オントロジーが採用する手法と異なる; (2)データ肥大化の誘因となる; という2つの課題を抱えている。先行オントロジーの多くは時系列データをRDF形式では持たず、それを保存するデータベースなどの場所を指定するためのプロパティを持つことで対象のエンティティと関連付けている。例として、RealEstate Coreと同様に建築資産の記述を対象とするBrick[47]は、hasExternalReferenceプロパティを介して特定の建築資産とその時系列データが保存されている場所を関連付けている。またRDF形式は一般に時系列データとして最適化されたものよりもサイズが大きくなる傾向にあると言われている。本提案で実装したLODでは、1インスタンスあたり数百バイトにのぼる。しかし時系列データを外部に委譲する先行手法は、データベースインスタンスに適切なスキーマやプロパティを設計する必要があるという欠点も存在するため、オントロジーにおける時系列データ表現は、スキーマファーストな設計

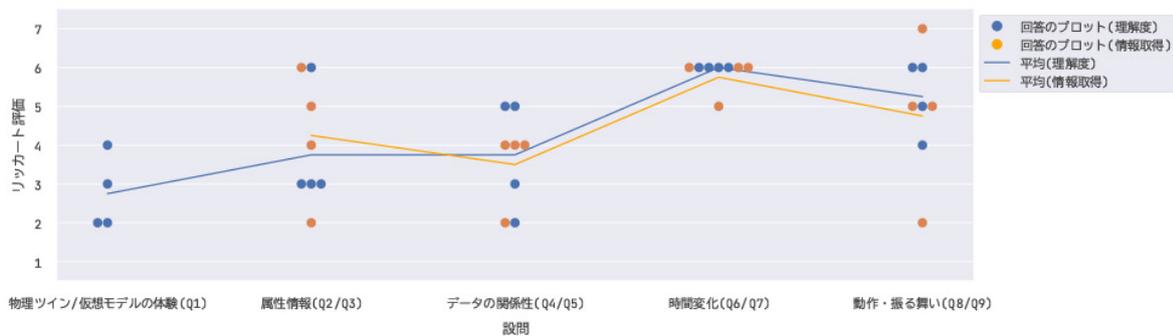


図7 ビューアアプリケーションに対する回答

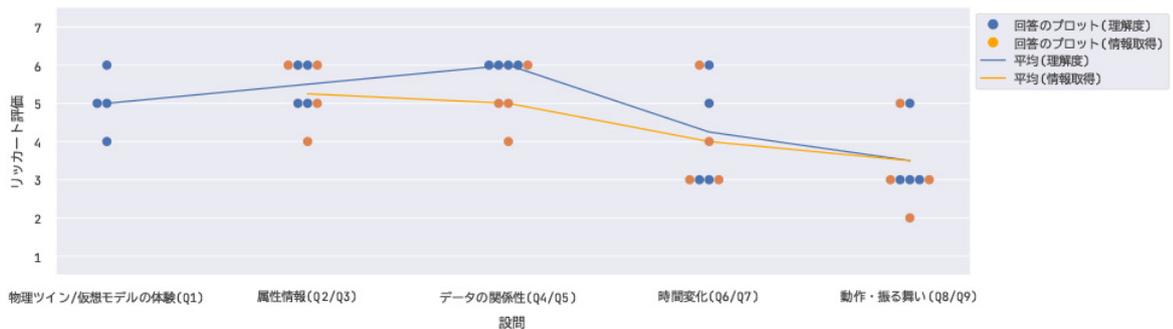


図8 グラフデータに対する回答

と技術的最適化のトレードオフにあると言える。

次に、ビューア設計及び情報提示について述べる。本研究で実装したビューアアプリケーションは、提案オントロジーの応用可能性を検証するとともに、リンクトグラフデータが表す情報の理解を促進させることを目的として設計した。Q2～Q9の設問は、Q2～Q5が静的な情報、Q6～Q9が動的な情報に関する理解度・情報獲得度を問うものとして分類される。図7と図8に示す設問Q2～Q9の回答から、ビューアとリンクとグラフデータはこの静的情報・動的情報の分類に関して逆の評価となる傾向が見られる。ユーザ評価で指摘のあった通り、ビューアで提示する属性情報はRDFデータ形式そのままであり、対人可読性に欠けることやスクロールしづらいという実装上の課題を起因として、理解度・情報獲得度が低くなったと考えられる。一方、動的情報に関してはビューアの方が理解度・情報獲得度が高い傾向が見られる。したがって、動的情報の提示には、RDFデータやリンクトグラフデータだけでなくビューアを併用することで、ユーザの理解度・情報獲得度促進を向上させると結論付けられる可能性がある。

最後に、概念の理解のしやすさについて述べる。DTOでは、基本的なデジタルツインアーキテクチャである物理世界と仮想世界の二元論ではなく、外界と物理ツインと仮想モデルから成る三元論による分類を基礎として設計した。またそれらに対応するクラスとして、HyleクラスとEidosクラスを定義した。インタビューの冒頭では、複数人の被験者からこれらの語彙の語源または意味に関する質問が上がった。Hyle及びEidosはアリストテレス哲学をまとめた「形而上学」で登場する概念である[48]が、意味が十分に知れ渡った概念とは言い難く、DTOに際してもクラス名だけでその概念を理解するのは難しい。また物理ツインと仮想モデルの理解促進も課題となった。ビューアアプリケーションは提案する三元論のデジタルツインアーキテクチャの直感的理解を促進させる目的で設計したが、アンケートQ1の結果では平均評価の4より高い評価が得られなかった。これはユーザ評価で回答を得た通り、アプリケーション内で確認可能な差分が少なかったことから、それぞれの概念の目的や意義が把握しづらかったことが原因と考えられる。これは、各概念に

紐づくクラスやデータが確認できるLODに対する同設問にて、平均評価の4未満の回答が無かった点とも合致している。提案したアーキテクチャに対する否定的な意見が無かったことも踏まえ、正常系と異常系の汎用イベントを追加するなどユースケースや応用例を充実させることで、本提案設計の意義や目的の理解を促進し、普及に繋げていくことが重要だと考えられる。

## 2.7 結論

本研究では、デジタルツインが抱える多様かつ異なるデータ資産を、オントロジーにより包括的管理を可能とする手法を提案した。建築情報からIoTデバイスに至るまで、既存の記述仕様や参照アーキテクチャを調査し、モデルベースでデータ駆動設計をおこなう現状の取り組み及び課題、要求事項を整理した。提案手法として、屋内エリアの時空間及び物理資産を表現可能なデジタル環境記述仕様であるDTOを設計した。従来の二元論的なデジタルツインを拡張し設計者視点を導入することで、Hyle及びEidosと定義した概念により、現実世界での物理状態と設計者視点での機能/振る舞いを体系的に構造化できる。また、センサから取得したテレメトリデータや独自に設計者が指定したスキーマを相互に連携し自由に変換するため、DCOを提案した。DCOはベースとなる“系”の概念と、変換及び具体的な関数の概念から構成される最小要件を満たしたものであるが、基本的なアフィン変換で実現される座標変換を表現可能であることを示した。これらの提案オントロジーを、オフィス環境を模した実験場にて収集したデータに適用し、LODとして構築した。さらに、プロトタイプとしてビューアアプリケーションの実装をおこない、デジタルツインの実装に至るプロセスを前提としたデータ資産の包括的管理やアプリケーションの相互運用性向上が可能であることを示した。加えて、提案オントロジーの表現の妥当性を検証するために、ドメインの専門家に対してアンケートを通した内容評価を実施した。オントロジーによって構成されるリンクトグラフデータは、エンティティに付随する属性情報や関係性の理解は十分におこなえるが、時系列変化を伴う情報や動作・振る舞いの表現は直感的ではないという傾向が見られた。一方、ビューアアプリケーションは動的表現を得意とするなど、リンクトグラフデータと逆の評価が得られたが、UIとして対人可読性を考慮した適切な情報提示

の工夫が要求されるといった課題が発見された。また、ユーザ評価において物理ツインと仮想モデルの有用性に関するより多くのユースケースが求められた通り、提案手法の理解促進や普及に向けた取り組みとして、適切なユースケースの検証と提示をおこなう必要があると考えられる。

### 第3章 GUTP BIM WGでのIFCモデルサーバを活用したアプリケーション実装

#### 3.1 IFCモデルサーバ

東大グリーンICTプロジェクト(GUTP)内にて、BIMデータをはじめとした建物に関わるデータの連携のためのプロトコルやアプリケーション開発手法の共通化を目標としたワーキンググループ(WG)であるBIM基盤WGが活動中である。BIM基盤WGでは、BIMをベースにしたデジタルツインアプリケーション開発のためのワークフローの検討および実証実験が勧められている。その最初の段階として、IFCから抽出したジオメトリとメタデータを格納したサーバ(IFCモデルサーバ)を開発・運用中である。格納されているジオメトリとメタデータはそれぞれウェブAPI経由で取得することが可能で、BIMデータの二次的活用が促進されることを目的としている。

#### 3.2 Webビューワ機能

2で作成したモデルサーバ内に含まれるデータの簡易的な確認、また今後のサーバ活用ユースケースの発展基盤として、ウェブブラウザベースのモデルビューワを実装した。ビューワに実装した機能は、ツリービュー・3Dビュー・オブジェクト詳細表示の大きく3つに分かれる。IFCデータは階層構造になっており、オブジェクト同士やオブジェクトと空間の間がどのような関係で定義されているのかを把握することで、データをより深く理解することができる。この目的のために図9のようなツリービューを実装した。ツリービュー内の各オブジェクト名をクリックすることで、後述する3Dビューにおける該当オブジェクト部分がハイライトされる機能も実装した。3Dビューは図10のようにモデルサーバ内のジオメトリデータをRGBA情報とあわせて可視化したものである。3Dビュー内の各オブジェクトも選択することが可能

- [-] Site 3GK5fuZ0H3lBol\_s8XFevF
  - [-] Building 3GK5fuZ0H3lBol\_s8XFevC
    - [-] Storey 3GK5fuZ0H3lBol\_sBUlyjC
      - [+] Space 2CC9lJbbbEgfQOxeZVZYVvk
        - Space 0lNHNFQG53bBvcAlN3tSw3
        - Space 0lNHNFQG53bBvcAlN3tSw6
      - [-] Space 1CzfeYyXbDoxEfHTFelArm
        - Element 0aW3RHclPE\_vpGwWauxXor
        - Element 0aW3RHclPE\_vpGwWauxXsz
        - Element 0aW3RHclPE\_vpGwWauxXtb
        - Element 1Br\_Ym1xr0uvTCbb2Df0Ff
        - Element 1Br\_Ym1xr0uvTCbb2Df0Fu
        - Element 1Br\_Ym1xr0uvTCbb2Df0FB
      - Space 32HooOieb6g8zYcKCaNK37
      - Space 32HooOieb6g8zYcKCaNK35
      - Space 32HooOieb6g8zYcKCaNK33
      - Element 1XiYcEDvz2JAKbWsVKmZvi
      - Element 1XiYcEDvz2JAKbWsVKmZkL
      - Element 2jP566P7LCTfDrHspqn15D
      - Element 2iP566P7LCTfDrHspan15K

図9 ツリービュー



図10 3Dビュー

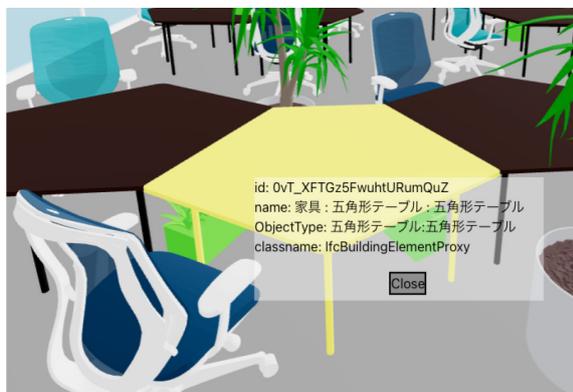


図11 詳細ウィンドウ

であり、選択によってツリービュー内の該当オブジェクト名のハイライトや、後述するオブジェクト詳細表示機能呼び出すことができる。3Dビュー内でオブジェクトを選択することで、図11のような該当オブジェクトの詳細情報を表示するウィンドウを3Dビュー内に表示させることができる。全体としては図12のような画面構成となっている。

### 3.3 実装

ビューはフレームワークReactを用いたJavascriptベースのアプリケーションである。3DビューはWebGLを簡易に扱えるJavascriptライブラリであるthree.jsを用いて実装した。3Dビュー内でのメッシュは、同一オブジェクトの同一材料をthree.jsのMergeBufferGeometry関数でまとめることで、描画を軽くした。アプリケーション全体の構成は図13のようにになっている。

### 3.4 利用方法

本アプリケーションは、専用のツールをインストールすることなく、ウェブブラウザからアクセスすることによりIFCデータの中身を確認することが可能である。データの階層構造や要素ごとの関係性を視覚的に把握できる。また、ツリービューと3Dビューの選択オブジェクトが連動していることにより、データ上の階層構造における位置付けと実際の空間における位置を紐付けて把握することができる。こうした特徴により、IFCに詳しくない人も含めて、IFCデータを簡易的に把握することに利用できる。

### 3.5 今後について

今後の開発方針は大きく2つの方向性がある。IFCに詳しくない人でも手軽にデータ把握を行えるアプリケーションであるという3.3で述べた特性を活かし、IFCの教育用のアプリケーションとしての機能拡張を進めていく方向性が1つ目である。この方向性では、他のIFCビューを調査し、IFCに詳しくない人の理解度を深めるためのさらなる機能を議論・実装していく必要がある。ユーザスタディを経て、ブラウザベースのIFC導入アプリケーションとしての有用性を示していく。2つ目の方向性として、2章で提案されたDTOなど、BIMには含まれていない意味情報を統合できるビューを作っていくことを検討している。現在のビューではIFCに含まれているプロパティやクラス情報を表示することは可能であるが、実際のユースケースでは独自の意味情報を付与したい場合も考えられる。ビュー上で特定のオブジェクトに独自の意味情報を付与したり、その意味情報でフィルターをかけられたりすれば、デジタルツインアプリケーションの基盤としての利便性は大幅に向上すると考えられる。この方向性を実現するためには、単なるビューの実装にとどまらず、DTOをはじめとする適切なオントロジの選定や、サーバも含めたセマンティクス保持のアーキテクチャについて議論する必要がある。

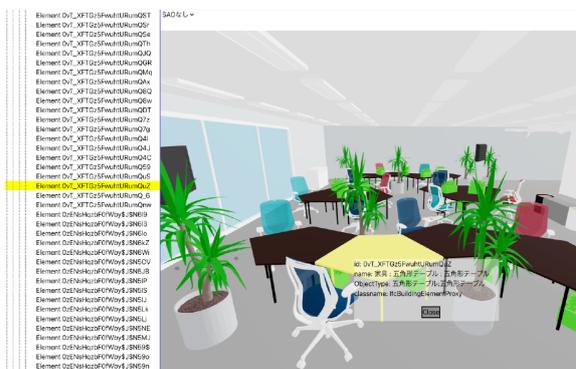


図12 ビュー全体画面

くない人でも手軽にデータ把握を行えるアプリケーションであるという3.3で述べた特性を活かし、IFCの教育用のアプリケーションとしての機能拡張を進めていく方向性が1つ目である。この方向性では、他のIFCビューを調査し、IFCに詳しくない人の理解度を深めるためのさらなる機能を議論・実装していく必要がある。ユーザスタディを経て、ブラウザベースのIFC導入アプリケーションとしての有用性を示していく。2つ目の方向性として、2章で提案されたDTOなど、BIMには含まれていない意味情報を統合できるビューを作っていくことを検討している。現在のビューではIFCに含まれているプロパティやクラス情報を表示することは可能であるが、実際のユースケースでは独自の意味情報を付与したい場合も考えられる。ビュー上で特定のオブジェクトに独自の意味情報を付与したり、その意味情報でフィルターをかけられたりすれば、デジタルツインアプリケーションの基盤としての利便性は大幅に向上すると考えられる。この方向性を実現するためには、単なるビューの実装にとどまらず、DTOをはじめとする適切なオントロジの選定や、サーバも含めたセマンティクス保持のアーキテクチャについて議論する必要がある。

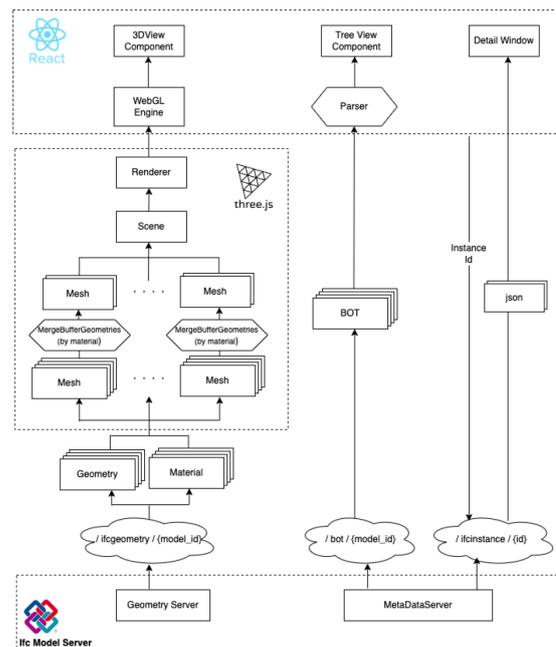


図13 ビューのシステム構成図

---

## 第4章 BIMベースの屋内位置推定技術調査

---

### 4.1 背景

自己位置推定とは、センサを活用して電子機器の位置や向きを推定する技術であり、自律走行が必要な車やロボットの分野では一般的な技術である。近年ではARアプリケーションなどの開発が身近になるにつれ、手持ちの電子端末に対しても本技術の需要が高まっている。特に屋内での自己位置推定は、位置推定技術として一般的なGPSの精度が十分でない場合も多く、より精度の高い推定方法の確立が求められている。自己位置推定は、他の通信機器とのやりとりにかかる時間から三角測量を活用して位置を推定する方法と、機器に取り付けられたレーザスキャナやカメラ、センサなどのデータから位置を推定する方法の2種類に分けられる。前者の方法はGPSにも用いられている手法であるが、各建物に専用の機器を設置する必要がありインフラコストが高くなってしまいう上、向きの推定には向いていないといった課題もある。端末内蔵の機器から取れるデータを利用した位置推定については、センサデータは補助的な活用が主であり、レーザスキャナから取れる点群データや、カメラから取れる画像データを用いた位置推定技術が盛んに研究されている。この際、位置推定と地図作成を同時に行うSimultaneous Localization and Mapping (SLAM)といった技術も存在するが、モバイル端末では計算量やメモリ負荷が大きくなりすぎる上、長距離の推定では誤差が蓄積されていってしまうことから、参照用マップを事前に用意した位置推定が一般的である。参照用マップの準備は建物ごとに行う必要があり、コストがかかってしまうが、近年ではBIMが入手可能な建物が増えてきている。BIMを参照用マップとして用いる位置推定技術を確立することができれば、BIMが入手可能な建物に対しては追加のコストなしで位置推定技術を利用することが可能になるため、屋内位置推定の普及に繋がると考えられる。こうした背景からBIMを参照として位置推定を行う研究が増えている。

### 4.2 BIMベース位置推定の研究調査

LiDARなどのレーザスキャナを用いたBIMベースの位置推定技術については、LiDARを搭載できるという性

質上、ロボットの位置推定の研究が中心となっている。Hendrikx[49]らはIFCファイルをロボットでも認識できる意味情報を付与したJSONLDに変換し、2D-LiDARによって取得した周辺の直線や角とのマッチングによって位置推定を行った。さらに別の研究[50]では、IFCに含まれる意味情報を点群マッチングに活用することで、Open3D SLAMなどのSLAM技術を上回る精度の位置推定に成功した。モバイル端末においては、ロボットに搭載されているような高性能なLiDARは搭載されていないため、画像ベースでの位置推定が主流となっている。画像自体の特徴量を利用した研究としては、BIMから建物内の画像を生成し、それらをCNNの学習データとして用いることで実際の画像の位置を予測するものがある[51]。この研究では位置の誤差が2.0-2.44m、向きの誤差が7.73-8.89°ほど大きく、精度は十分とは言えない。Chenら[52]はこの原因をBIMから生成される画像が現実的ではないことであると、現実の写真を用いたGANによってよりリアルな写真を学習データとしても用いた。しかしながら、位置の誤差が1.38-2.89m、向きの誤差は10.1-13.9°ほどで、精度の改善にはつながらなかった。一方で、位置の予測にかかる時間は0.52-0.66秒であり、事前の予測位置情報がなくても高速に位置の推論が行えることが示されている。LiDARによる位置推定では、点群同士によるマッチングを行えるため、正確で頑強な位置推定を行うことが可能である。Chen[53]らはこの点に着目し、画像データから点群を生成することで画像ベースの位置推定で点群マッチングを実現している。彼らは事前にBIMデータから点群データを生成しており、連続画像からStructure from Motion (SfM)技術を使って作成した点群とのマッチングによって位置推定を行った。これにより、平均の位置誤差は1.07m、平均の向き誤差が3.7°と、大幅な精度向上を見せた。一方で、SfMの計算や点群のマッチング候補算出にかかる時間が膨大であるため、位置推定の計算には平均で25秒かかっており、リアルタイムでの位置推定にはほど遠い状態となっている。

### 4.3 今後の展望

画像を利用したBIMベースの自己位置推定技術は、精度と計算時間の両面で実用に足る研究はまだないと思われ、今後の発展が望まれている。画像データから点群を生成する手法をベースにする場合は、計算時間の短

縮が重要な課題である。これについては、Incremental SfM[54]によりSfMの計算にかかる時間の短縮を狙えると考えている。Incremental SfMはリアルタイムのSfMのために開発された手法で、計算時間は約0.5秒未満となっているため、点群生成部分をこの手法に置き換えることで大幅な計算時間短縮が見込めると考えられる。また、センサデータを事前の位置予測に用いることでマッチングする参照点群の範囲の絞り込みを行うことでさらなる計算時間の短縮が見込める他、BIMの位置情報をマッチングに活用する研究[50]を画像ベースの位置推定にも応用することで、精度の向上を狙うことも可能である。現在の点群マッチングによる位置推定では、1ステップ前の位置推定結果を事前予測として用いることが必須であるため、初期位置は既知としている場合が多いことも課題の一つである。これを克服するため、初期位置のみCNNを用いて粗く推定し、その結果を用いて1ステップ目から点群マッチングによる位置推定を行う手法も検討中である。CNNによる推定は正確ではないものの、事前の位置情報がなくても素早い位置推定が行えるという強みを活かした手法であり、既存の課題解決に貢献しようと考えている。

---

## 第5章 5G環境下におけるWebRTCリアルタイム遠隔コラボレーションのQoE計測

---

### 5.1 研究概要

昨今、より低遅延な遠隔コラボレーションへの注目が集まっており、特に自動運転分野においても、遠隔監視などのユースケースが提案されている。また、2019年より世界中でサービス開始された5Gは、大容量・低遅延通信が期待されているため、遠隔コラボレーションの需要に対して重要なインフラであると考えられている。しかし、現状の5Gはカバレッジエリアの拡大やスループットの改善に焦点が当てられており、3GPPなどの標準化にて策定された機能が全て動作しているわけではない。そのため、遠隔コラボレーションの実現に向けた性能・用途の詳細な検討が必要不可欠である。そこで、本研究ではWebRTCを用いた遠隔コラボレーションを用いて、様々な5G環境下での遅延・映像音声品質の計測と分析を行った。具体的には、WebRTC通信品質と同時に5G通信の電

波状況を詳細に調査し、それらの結果データを統合した。次に本統合データを分析し、可視化した結果をもとに遠隔コラボレーションが実現可能なユースケース検討を評価した。本評価において、交通手段とWebRTC通信の性能の関係(自動車/山手線)、および車載環境のシナリオにて同時に4つの通信事業者を活用した性能向上の可能性の2点を明らかにした。

### 5.2 課題

昨今のウィズコロナ・ポストコロナ時代において、社会におけるもっとも顕著な行動変容として、リモート活動の一般化が挙げられる。このリモート活動の核となるのが、リモート間をリアルタイムで接続してインタラクティブな通信を行う遠隔コラボレーションである。遠隔コラボレーションの中で、いくつかの成功したユースケースが、ZoomのようなWeb会議サービスや、コンサートやライブのリアルタイム・ストリーミング配信、ライブコマース、音声SNSなどが挙げられる。我々は一般的にこういった成功事例のみをリモート活動であると認識しがちであるが、実際にはその裏で、現在の技術水準では実現困難な多くのリモート活動の在り方などが検討され、実現困難であるがゆえに埋没してきた現実がある。その代表格として挙げられるのが、リモート間の映像・音声同期を要する遠隔コラボレーション活動である。例えば合奏や、ライブやスポーツイベントなどにおける歓声などは、コロナ禍においてリモート活動への転換が図られたが、通信遅延の制約によって、そのような取り組みが大きく社会に普及することはなかった。曾根らの研究[55]は遅延のある演奏系において、満足な合奏体験をするためには片道遅延が30ms未満である必要があることを報告しているが、これは現代のプロードバンド環境においても非常に厳しい条件である。この通信遅延の制約は、主として二点挙げられる。まず一つ目は、現状の一般エンドユーザー向けに普及している固定ブロードバンド通信が、依然として宅内・ラストワンマイルの高遅延の影響を受ける場合があるという点である。二つ目は、そもそも近年の消費者向けブロードバンドの主体は固定ブロードバンドからモバイルブロードバンドに移行しつつあり、固定ブロードバンド上でしか使用できないサービスはスケールアップではないという点である。

上述の問題を回避し、遠隔コラボレーションを社会実装するうえで解決策として成りうる可能性として、昨今急速に普及が進んでいる5Gモバイルブロードバンドが挙げられる。5Gモバイルブロードバンドは、4G以前のモバイルブロードバンドと比較して、無線区間で大容量・低遅延の通信が実現可能で、理想的には遠隔コラボレーションなど低遅延ユースケースの実現を期待できる。したがって、将来的には5Gの長所である高い通信性能を生かした遠隔コラボレーションサービスを普遍的に享受しうる可能性が高い。しかしながら、RAN (RadioAccess Network)の機能分割に伴う異なるアーキテクチャ導入による異なる性能の混在化、昼夜異なる混雑率、性質の異なる複数の周波数導入、ハンドオフなどによって、通信が不安定となることが多く、また、現在はまだ4G環境のコア機能を共有している状態で、その真価は依然として発揮されていない状態にある。

このような問題を解決し、遠隔コラボレーションの社会実装を進めるうえで最も重要となるのは、まず第一に5Gモバイルブロードバンドの性能向上であるが、真に理想的な大容量・低遅延モバイルブロードバンドが実現されるには以前として長い時間を要すると考えられる。従って、どういった条件下でどのような遠隔コラボレーションが実現できるか、どのような制約が存在するのかについて具体的に明らかにすることが重要であり、本研究ではこれを問題意識とした計測を行った。

### 5.3 関連研究

#### 5.3.1 5Gモバイルブロードバンドの通信性能に関する研究

5Gモバイルブロードバンドに関しては、モバイルブロードバンド自体の一般的な通信性能の研究と、あるモバイルブロードバンドをある特定用途で活用するシナリオを想定した際の通信性能の研究の二種類が存在する。

まず、モバイルブロードバンド自体の一般的な通信性能の研究として、Xu et al.[56]は中国での商用5G導入の初期段階で、大学のキャンパス内の5Gモバイルブロードバンドに対して計測を行い、有効な利活用のために必要なプロトコル改善やレガシーのインフラとの共存策についての示唆を与えた。Narayanan et al.[57]は、米国での商

用5G導入の初期段階で、キャリア3社のmmWave、Sub-65Gのスループットをスマートフォンを用いて計測し、ハンドオフ時のスループット変動、アンテナに対する角度や距離などとスループットの関係性、自動車での移動時の性能変動などを明らかにした。Panet al.[58]は、中国の高速鉄道の、5G Sub-6によってカバーされた路線で、高速移動時の5GのRSRP、SNRといった電波情報や、ハンドオフ間隔の累積分布、ハンドオフ時の性能変動などの情報を収集した。

#### 5.3.2 WebRTCを用いた遠隔コラボレーション

WebRTCとはWeb Real-Time Communicationsの略で、ブラウザやモバイルアプリに簡潔なAPIを通じてリアルタイム通信を提供するオープンソースの技術である[59]。そのため、仕様が全てオープンであり、通信の詳細まで定義することが可能であるためアカデミックの領域でも様々な検討が行われている。実際にWebRTCを用いる通信のQoE・QoSを扱う論文は数多くある。

金子らの研究[60]では、車載環境下でWebRTCをメディアストリーミングに使用する際に、セルラーインターネットを複数束ね、UDPパケットをマルチパス制御して転送を行うことで、ハンドオフの影響を低減させる手法を提案した。石原らの研究[61]では、無線LAN環境下で多くのユーザーがWeb会議アプリを使用するようなユースケースを想定した際のQoEを簡単に計測するために、Raspberry PiとWebRTCを使用したストリーミング品質計測ツールを提案した。Moulay et al.[62]は4G LTEモバイルブロードバンド上でWebRTCによるストリーミングを行った際の実環境性能を計測した。

上述にて説明した先行研究と本研究との比較を表2に示す。表より、5G、WebRTCそれぞれについては数多くの

表2 先行研究との比較表

論文	環境	移動モード	計測方法	電波情報
Xu [29]	5G	歩行/自転車	Ping,iperf,video	✓
Narayanan [30]	5G	歩行/自動車	Ping,iperf	✓
Pan [31]	5G	高速鉄道	Ping,iperf,QUIC	✓
Moulay [35]	4G	自動車	WebRTC	×
金子 [33]	4G	移動なし	WebRTC	×
石原 [34]	Wi-Fi	移動なし	WebRTC	×
本研究	5G	歩行/自動車/鉄道	WebRTC	✓

研究がこれまで実施されてきたが、5GかつWebRTCという問題意識で行われている研究は少なく、また移動モードに着目し複数の検討を行っているのは本研究のみである。

## 5.4 要求事項

### 5.4.1 様々なユースケースに対応可能、かつ簡単な計測クロスプラットフォーム運用性

本研究では多様なモバイルブロードバンドのユースケースに対応して計測を行うため、PC、スマートフォン、CLI環境などでクロスプラットフォームで一元的に計測を行うことができるツールを作成することを目指した。

#### Webブラウザ上で動作

近年、ネットワーク計測では、従来のpingやiperfのような専門ツールではなく、fast.com<sup>\*5</sup>やiNonius<sup>\*6</sup>などのWebブラウザベースの計測が主流となっている。本研究では先述のクロスプラットフォーム運用性の向上、かつ将来的に一般ユーザーが容易に利用しやすいような実装として、Webブラウザ上で動作する計測ツールを実装した。

#### P2Pでのリアルタイム性計測

fast.comやiNoniusなどの既存のWebベース計測ツールは、サーバ・クライアント方式を意識した実装となっているが、近年ではエンドツーエンドをP2Pで結んだ遠隔コラボレーションも注目されている(WebRTC・リモート合奏・FPSゲーム等)。本研究ではNATを超えたP2P接続のリアルタイム性を計測可能なツールを作成し、計測の始点・終点を自由に設定可能な計測ツールを作成することを目指した。なお、本研究では主として自宅PC環境・モバイル環境の通信品質計測を行っているが、計測の起点をサーバに変更すると、サーバ・クライアント方式の計測も行うことが可能である。

### 5.4.2 遠隔コラボレーションというユースケースに特化した計測

#### 映像・音声 streams された状態での計測

pingやiperfといった既存の計測手法は、パケットの創

出頻度・データサイズ・輻輳制御アルゴリズム等が、実際の遠隔コラボレーションと異なっており、これらによる計測が直ちに遠隔コラボレーションのQoEについて議論するうえで信頼に足るとは言い難い。本研究では、実際の遠隔コラボレーションと同様、WebRTCを使用して映像・音声をストリームした状態でのリアルタイム計測を行うことが可能なツールを作成した。

#### ストリームされた映像・音声を保存

遠隔コラボレーションでは、最終的な目標として、低遅延な映像音声の伝送のみならず、その映像音声が人間にとって高品質に近くできることも重要である。本研究では実際にリモートからストリームされた映像音声データをローカルに保存することが可能な計測ツールを作成し、生の動画音声データの解析を可能とすることを目指した。

### 5.4.3 モバイルブロードバンドの特徴詳細に把握する計測

#### 電波情報をリアルタイムに取得

本研究では様々なバンドが混在している実環境5Gについて、バンドごとの通信性能計測を行うため、4G/5Gや電波強度といった、スマートフォン上でピクトグラム表示されている情報のみならず、NrArfcnや帯域幅といった、より通信品質に直接影響を及ぼすような数値をリアルタイムに取得することを目指した。

#### 時刻・位置情報をリアルタイムで正確に取得

本研究では実環境5Gについて、場所や移動速度などといった変数も考慮した分析を行うために、時刻や位置情報をリアルタイムで取得しながらdumpデータを作成することを目指した。

## 5.5 システム設計

既存の計測方法であるpingやiperf、パケットの創出頻度・データサイズ・輻輳制御アルゴリズム等による計測が遠隔コラボレーションのQoEについて議論するうえで信頼に足るとは言い難い。そこで本研究では、実際の遠隔コラボレーションと同様、WebRTCを使用して映像・音声

\*5 <https://fast.com/ja/>

\*6 <https://inonius.net/speedtest/>

をストリームした状態でのリアルタイム性計測を行うことが実測可能なシステム(以下、計測システム)を設計する。QoE計測に関して、遠隔コラボレーションでは、低遅延な映像音声の伝送のみならず、その映像音声が人間にとって高品質に近くできることも重要である。そのため、実際にリモートからストリームされた映像音声データを

ローカルに保存することが可能な計測ツールを作成し、生の動画音声データの解析を可能とすることを目指している。

計測システムの全体構成は図14に示す。図より、①と②に関しては多様なモバイルブロードバンドのユースケースに対応して計測を行うため、PC、スマートフォン、CLI環境などでクロスプラットフォームで一元的に計測を行うことができるツールを設計している。次に、③について、近年、ネットワーク計測では、従来のpingやiperfのような専門ツールではなく、fast.com<sup>\*7</sup>やiNonius<sup>\*8</sup>などのWebブラウザベースの計測が主流となっている。そのため、本設計においては、先述のクロスプラットフォーム運用性の向上、かつ将来的に一般ユーザーが容易に利用しやすいようにWebブラウザ上で動作する計測ツール

表3 ソフトウェアバージョン

Name	Version
node.js	v14.15.1
Google Chrome	105, 106, 107, 108
SmartViser	6.13.1, 6.14.0
OBS Studio (64bit)	28.1.2
Selenium	4

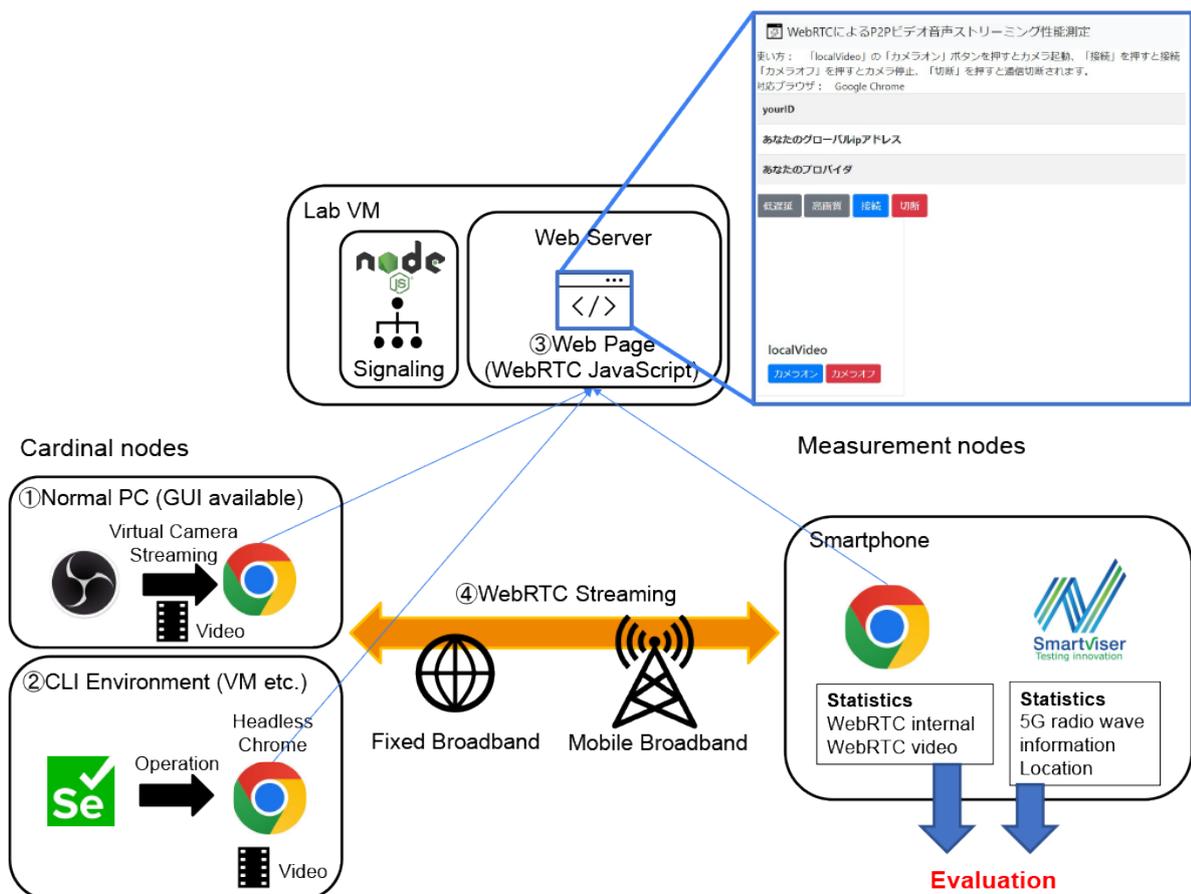


図14 計測システムの全体構成

\*7 <https://fast.com/ja/>

\*8 <https://inonius.net/speedtest/>

を実装する設計としている。一方で、④を設計した背景として、fast.comやiNoniusなどの既存のWebベース計測ツールは、サーバ・クライアント方式を意識した実装となっているが、近年ではエンドツーエンドをP2Pで結んだ遠隔コラボレーションも注目されている(WebRTC・リモート合奏・FPSゲーム等)。そこで、本設計では、NATを超えたP2P接続のリアルタイム性について、計測の始点・終点を自由に設定可能な計測ツールを作成することを目指している。また、本稿において主として自宅PC環境・モバイル環境での通信品質計測を行うが、計測の起点をサーバに変更すると、サーバ・クライアント方式の計測も行うことが可能になっている。

本研究では、WebRTCの計測プログラム、およびNATを超えたP2P接続に必要なシグナリングサーバを固定IPアドレスを持ったVM上に配置し、そのサーバに、各クライアント端末(スマートフォン・PC)からGoogle Chromeを用いてWebアクセスすることにより、実験を行う構成とした(各ソフトウェアVersionは表3参照)。クライアントのスマートフォン上には、モバイルの接続情報(バンド・電波強度・帯域幅等)を取得することができるSmartViserというソフトウェアをインストールし、計測中は常にアクティブ状態にしてログを蓄積させた。

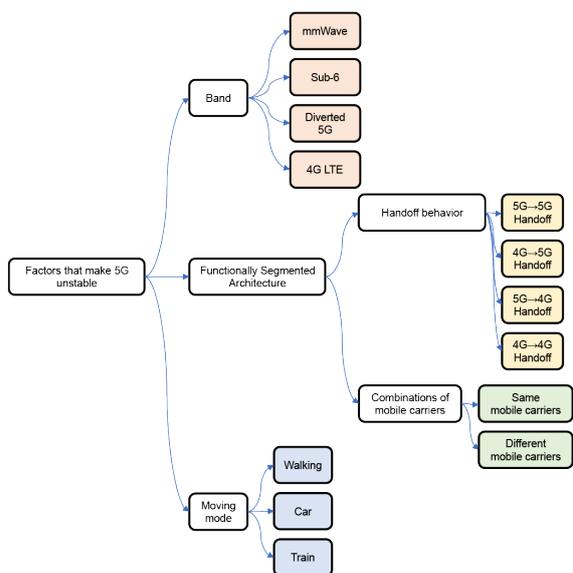


図15 課題の分類と計測対象の定義

## 5.6 計測対象

アクセスしている各通信事業者の通信帯域毎に遠隔コラボレーションを行った際のRTTといったリアルタイム性を表す指標について計測・分析を行うことを目指す。また、4G → 5Gハンドオフ機会の増大がQoEに与える影響についても検討を行うことを目指す。また、移動モード別で切り分けた性能についても検討を行うことを目指す。そのため、課題別に図15のように計測対象を細分化して定義した。

## 5.7 実験方法と結果

本章では、5Gを用いた複数のシナリオの実験方法と結果について説明する。また、実験において用いた諸元を表4に示す。表より、本実験では4つの通信事業者のSIMカードを4台のスマートフォンに挿入し測定を行っている。以降の節にて各シナリオについて説明していく。

なお本章におけるQoE指標の名称と意味の対応関係については表5に示す。

### 5.7.1 ハンドオフ挙動

各ハンドオフの組み合わせごとにcandidatePair\_RTTをヒートマップ可視化したものを図16に示す。ヒートマップにおける代表値は、ハンドオフした時点以降の5エントリの中央値を、各ハンドオフの組み合わせごとに平均

表4 実験諸元

Device	Value
携帯端末	Pixel 6 Pro (Tensor, 12GB RAM)
宅内 PC	Core i7-10875H, 64GB RAM
VM (東大内)	Broadwell, 4GB RAM
エリアテスタ	VIAVI ONA-800A
キャリア	docomo, KDDI, Softbank, Rakuten
バンド	4G, 5G_NSA(n77, n78, n257, 転用)

表5 QoE指標

名称	意味
candidatePair_RTT	Google STUN への RTT
RIV_roundTripTime	動画ストリームの RTT
RIA_roundTripTime	音声ストリームの RTT

したものである。また、本研究では基地局の切り替わりを検出できず、バンドの切り替わり時点のみをハンドオフとして扱っているため、BeforeとAfterが同じバンドであるマスは、ハンドオフしていない状態を参考値として記載しているものである。この結果は4キャリアで16パターンものハンドオフを可視化しており、各場合においてデータの蓄積数が十分であるとは言えず、実際に7パターンのハンドオフが未検出である。特筆すべき結果としては、KDDIのmmWaveと転用5G間のハンドオフ時に高いRTTが観測されたことが挙げられる。これは他キャリアでは見られなかった特徴で、コアネットワークの実装の特異性に起因するものと考えられる。Softbankでは全体傾向としてmmWave、Sub-6へのハンドオフは低遅延であり、転用5GとLTEへのハンドオフは高遅延である結果であった。これはハンドオフの影響というよりも、各バンドが本来有している通信性能の影響を受けている可能性が高く、逆説的にハンドオフ遅延による影響が他キャリアと比較して小さいという可能性が考えられる。RakutenではmmWave → 転用5G、Sub-6 → 転用5GのRTTが、mmWave → LTE、Sub-6 → LTEの遅延に比べて小さく抑えられており、これは5G5Gハンドオフが、5G4Gハンドオフよりもオーバーヘッドが少ないことを示している結果であるといえる。

### 5.7.2 キャリアの組み合わせごとの性能比較

KDDIとSoftbankの4G/5Gの組み合わせごとの性能比較を図17に示した。この結果では、KDDI 5GとSoftbank 5Gの組み合わせではcandidatePair\_RTT値が良好であるが、KDDI 5GとSoftbank 4Gの組み合わせではcandidatePair\_RTT値が最悪であったり、KDDI 5GとSoftbank 5Gの組み合わせがKDDI 5GとKDDI 5Gの組み合わせを凌駕していたりと、直感に反するような結果が複数例見られた。

### 5.7.3 歩行シナリオ

図18に楽天モバイルの4GとmmWaveを用いた測定結果をCDF (Cumulative Distribution Function) で示す。図より、4Gと比較しmmWaveによるRTT改善効果は、UEの静止状態・UEと基地局の間に遮蔽物が存在しない場合には期待できることが分かる。しかし、mmWaveに接続した状態で、歩行程度の動きや遮蔽物が存在すると、概ね70ms以上の遅延の発生確率が4Gよりも高くなることが

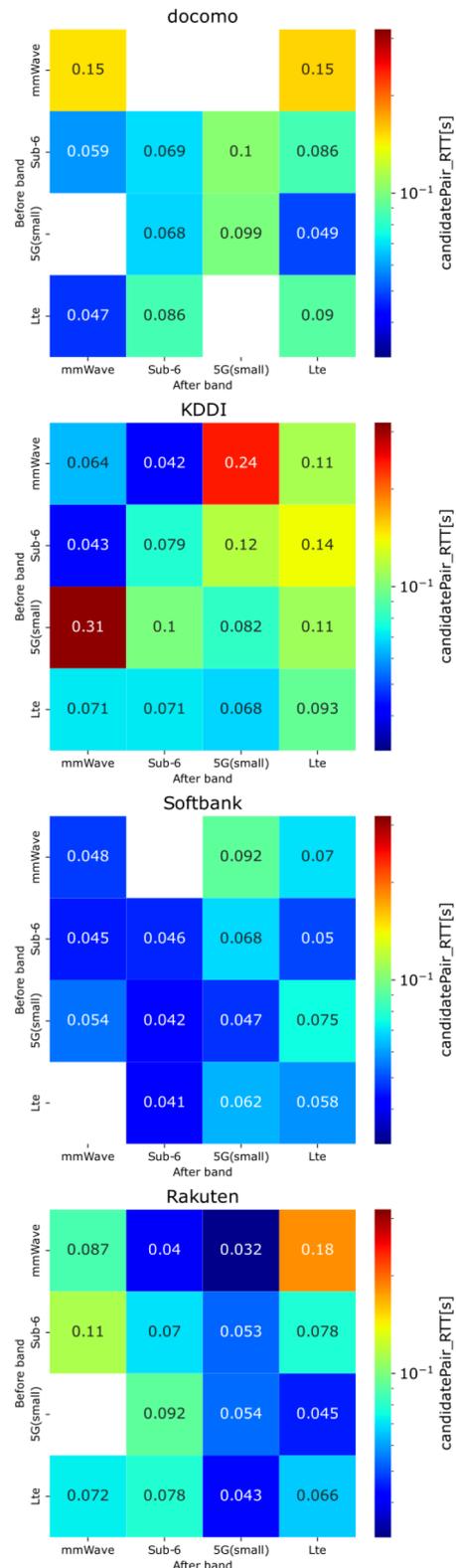


図16 ハンドオフの組み合わせとcandidatePair\_RTTの関係。10msから320msまでをlogスケールで着色。縦軸がハンドオフ前のバンド、横軸がハンドオフ後のバンド。

分かる。これは、5G → 4Gのハンドオフの確率が増加し、ハンドオフ中のリアルタイム通信のQoEが低下していることを示唆する結果である。

#### 5.7.4 鉄道(山手線)シナリオ

山手線の上野駅ー有楽町駅間の6.3kmの往復区間で、実際に電車で乗車して計測を行った。計測対象のキャリアは、山手線全線を5Gカバーしたと公式発表しているKDDIとした。上野駅ー有楽町駅区間には、この2駅を含めて合計6駅あり、各駅の天井に5Gの基地局が設置されている(図19)。計測は2回行い、1回目ではUEの接続モードを5G優先、2回目ではUEの接続モードを4Gのみとした。1回目の計測と2回目の計測は別日に実施しているが、電車内の混雑条件等に顕著な変化は見られなかった。

各バンドごとの通信性能比較を図20に示す。各バンドごとと比較した状態では、mmWaveが突出して良い性能を示していることが分かる。これは、mmWaveの基地局が駅舎の天井に設置されており、なおかつ駅構内は障害物が少ないため、mmWave通信において理想的な条件が整っているからであると考えられる。また、特筆すべき結果として、5G優先モード時のLTE性能と、4Gのみモード時のLTE性能に顕著に差があるということが挙げられる。これは、5G → 4Gハンドオフが、LTEの性能に悪影響を及ぼしていることを示した結果であると言える。

#### 5.7.5 自動車シナリオ

新宿エリア、渋谷エリアでの地理的なWebRTCのRTT(candidatePair\_RTT)分布を図21、図22に示す。新宿や渋谷スクランブル交差点は、東京都内でも特に5G基地局が密に整備されているのにもかかわらず、赤色の点が目立ち、他方で、表参道や神宮外苑周辺では比較的通信性能が安定していることが分かる。

図23は、candidatePair\_RTTと、GPSの位置情報の時間変化から算出した移動速度の関係性を示した箱ひげ図である。各キャリアとも、移動速度が遅い領域では外れ値が多く、移動速度が速い領域では外れ値が小さくなる傾向が見られる。また、速度とRTTに対して無相関検定を行うと、docomoとSoftbank、RakutenではP値が有意水準1%を下回っており、両者には相関があることが分か

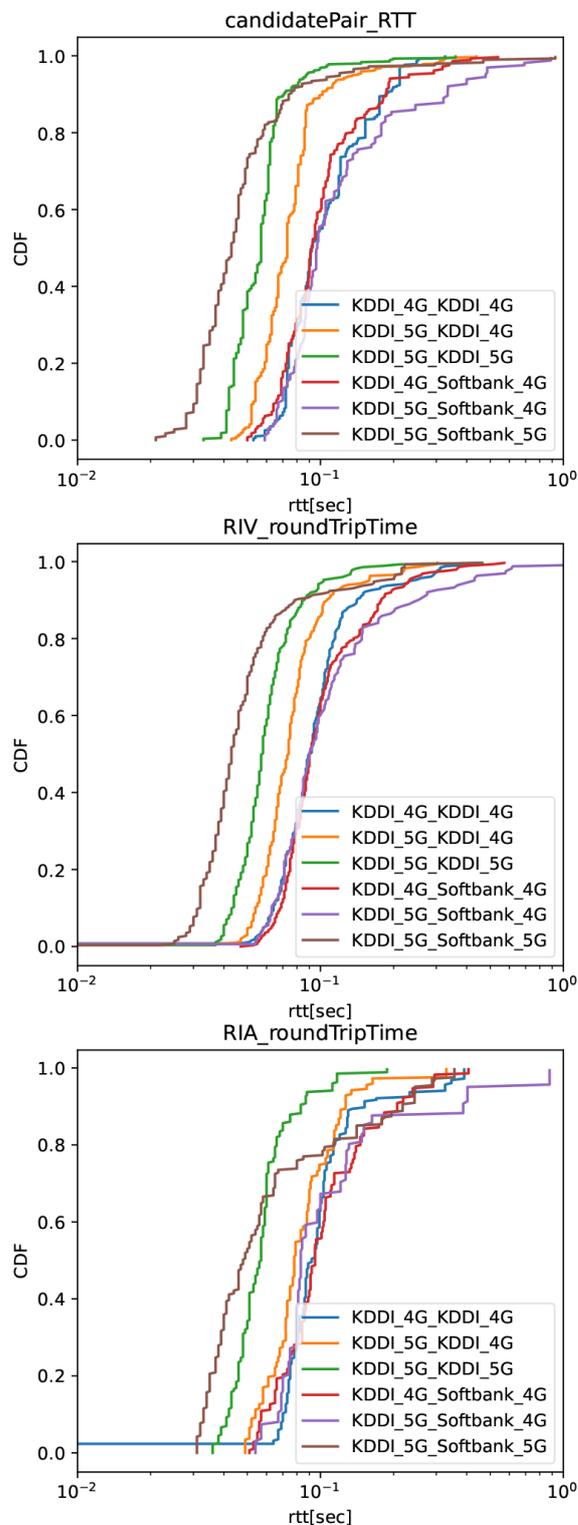


図17 KDDI 4G/5GとSoftbank 4G/5Gの組み合わせ。横軸はRTT値、縦軸は累積分布関数。

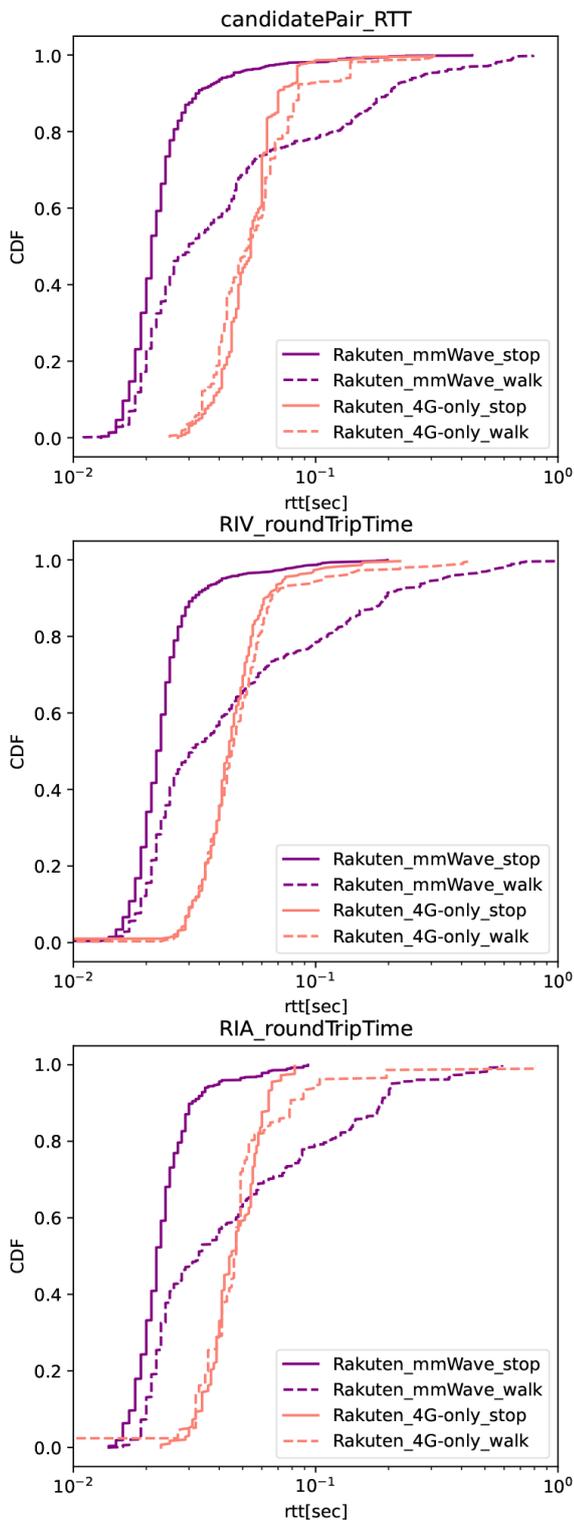


図18 5Gミリ波基地局前で歩いた場合と、立ち止まった場合の性能比較(楽天・SL広場)。4Gで同シナリオを実施した場合との比較。横軸はRTT値、縦軸は累積分布関数。

る。しかしながら相関係数についてはdocomoが0.0663、KDDIが0.0103、Softbankが0.0341、Rakutenが0.0255となっており、相関は非常に弱い。

また、キャリアごとの比較、および全キャリアの中で、各時刻に最良の性能を有していたものを合計したもの(Best of All)との比較をを図24に示した。まず各キャリアの比較では、Softbankが相対的に性能がよく、KDDIは性能が悪い。また、Best of Allでは、各キャリア個別の性能よりも大幅に性能が向上されており、概ねRTTが50ms 以内に収まっている。

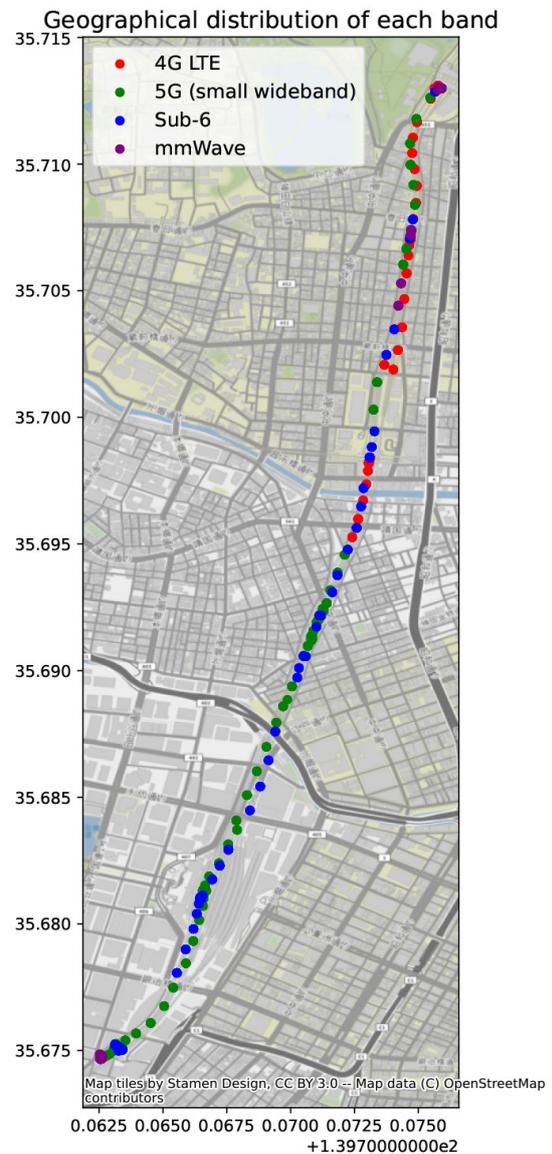


図19 山手線KDDIのバンド分布。横軸は経度、縦軸は緯度。

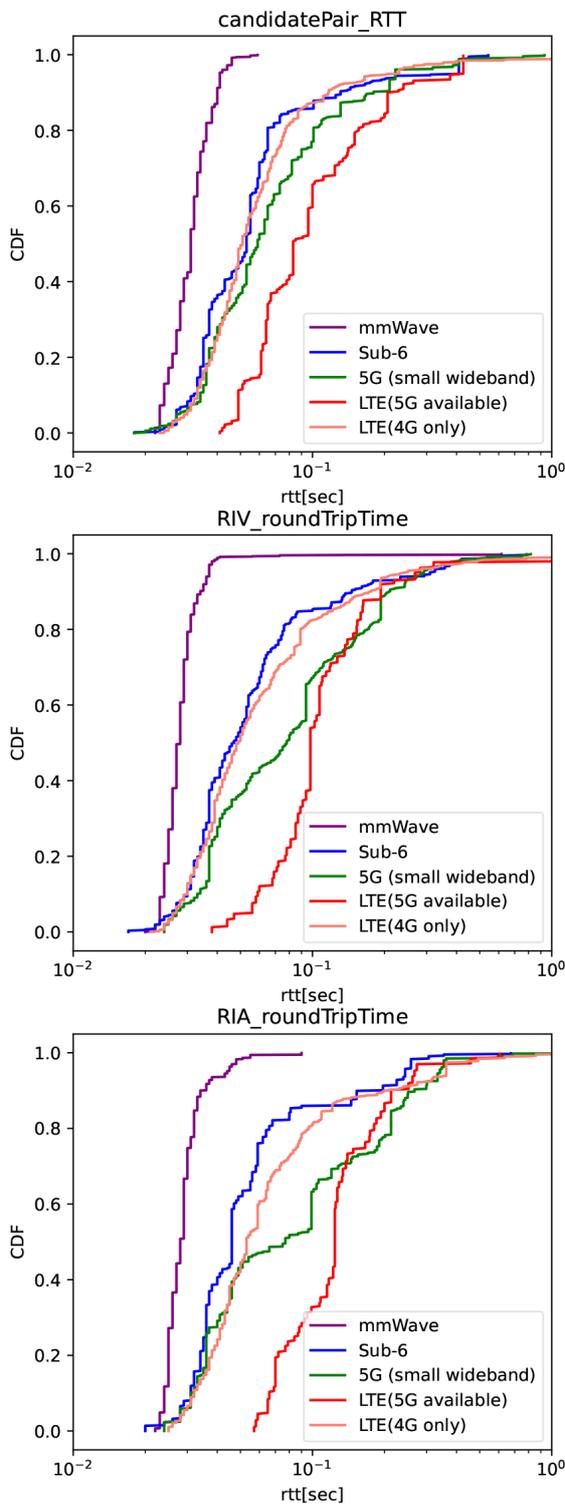


図20 各バンドごとの通信性能比較(KDDI、山手線)。横軸はRTT値、縦軸は累積分布関数。

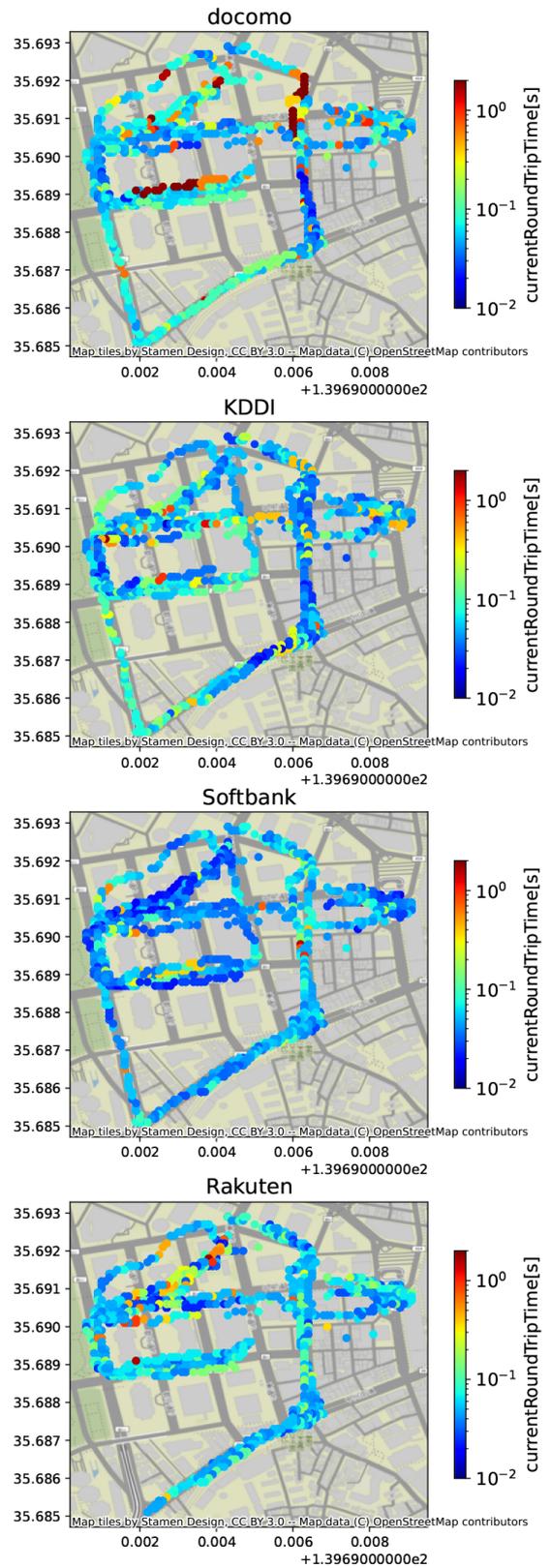


図21 新宿エリアの、各キャリアごとの通信性能(自動車)。横軸は経度、縦軸は緯度。

## 5.8 考察

### 5.8.1 mmWaveによる遠隔コラボレーションQoEへの影響

mmWaveの直進性の高さ、および遮蔽物に対するRobustness性の低さは多くの先行研究により研究されているが、実際のモバイル環境において、遠隔コラボレーションのQoEに悪影響を及ぼすということが図18の結果により示された。従って、mmWaveを遠隔コラボレーショ

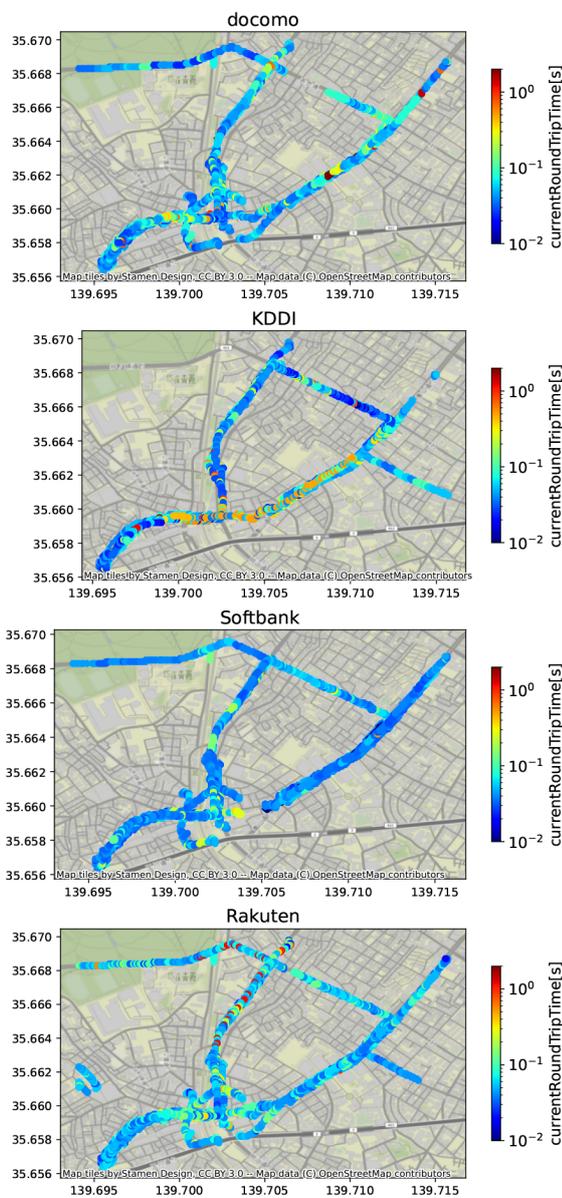


図22 渋谷エリアの、各キャリアごとの通信性能(自動車)。横軸は経度、縦軸は緯度。

ンのQoE向上を目指して導入する場合、遮蔽物や移動がほとんどないようなユースケースのみに適用可能であると考えられる。

### 5.8.2 頻繁なハンドオフ発生に起因するRTT劣化問題

図23では、速度とRTTには非常に弱い相関しか見られなかったが、低速域では散らばりが大きく、高速域になるにつれて収束していく傾向が見られた。これは、速度とRTTは相関関係にはないものの、市街地を低速で走行して、高密度な5Gカバレッジエリア環境下での頻繁にハンドオフするようなシナリオは、場合によっては低い遅延が得られるが、ハンドオフ等のイベント発生時には不安定になりうることもあり、逆に首都高速道路のような郊外道路を定速で走行するようなシナリオでは、マクロセル基地局の通信性能に収束していくということを意味していると考えられる。

### 5.8.3 複数の通信事業者の併用化による通信改善効果

図24に示されているとおり、各キャリアを別々に用いた場合よりも、全キャリアの中で最良の性能を利用し続けることで、大幅なリアルタイム通信性能改善が見込めることがわかる。これは5Gモバイルブロードバンドと、マルチパス通信技術を併用することにより、現在ではできない様々なユースケースが生まれうる余地があることに

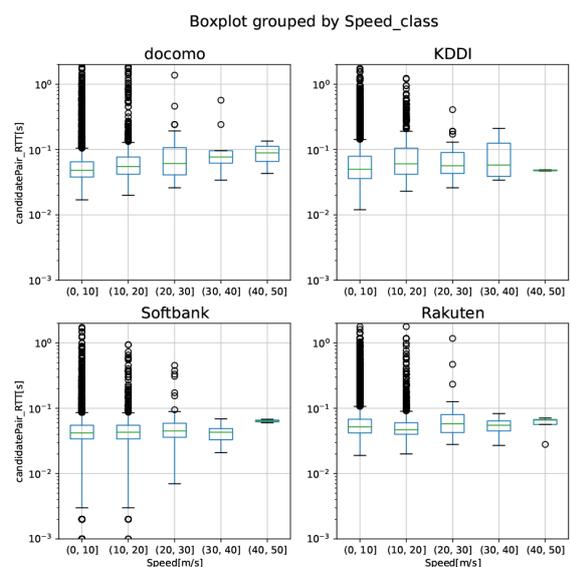


図23 各キャリアごとの通信性能と移動速度の箱ひげ図(自動車)。横軸は秒速(m/s)、縦軸はcandidatePair\_RTT値。

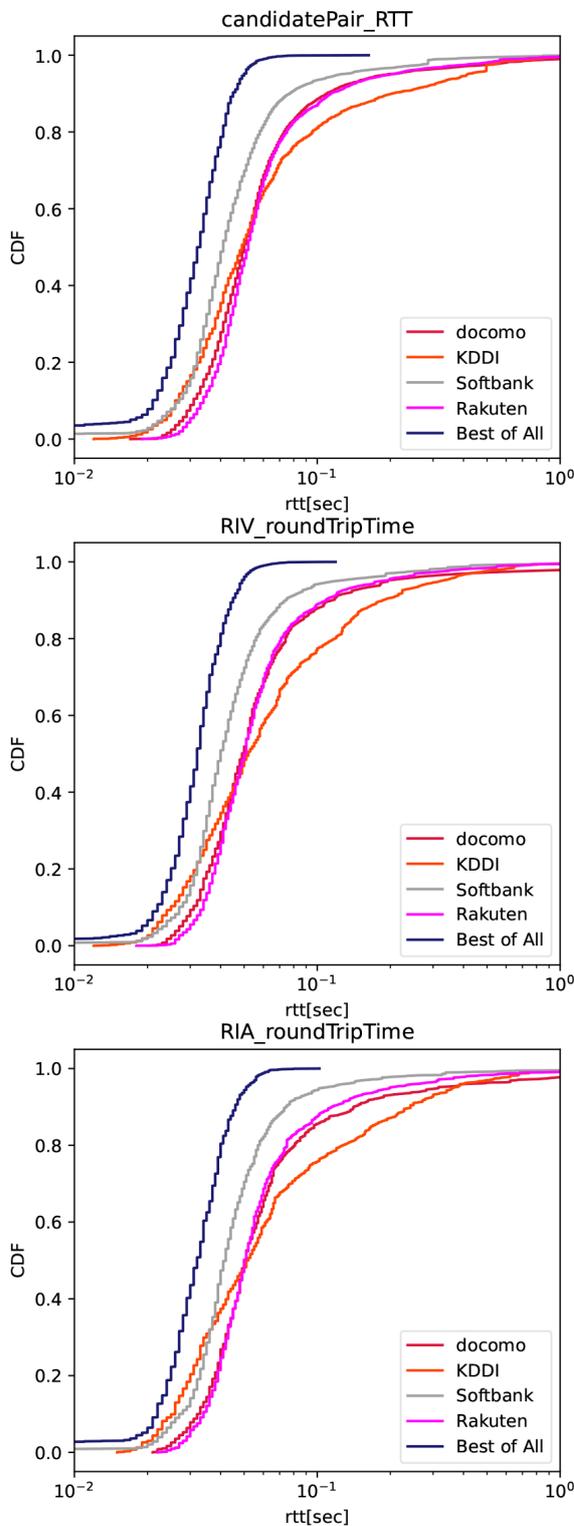


図24 キャリアごとの通信性能比較と、全キャリアの中で最善のものを選択した場合の通信性能(自動車)。横軸はRTT値、縦軸は累積分布関数。

他ならない。全キャリアの中で最良の性能を利用し続けるというのはあくまで最も理想的な条件に過ぎないが、このシナリオの場合、概ね50msのRTTでほぼすべてのパケットが到達しうる。これは昨今、商用化が進められている車載のオンラインゲームのようなユースケースで優れたQoEを実現するには十分な数値であり、なおかつ合奏のような最もハイレベルな遠隔コラボレーションを実現することも視野に入る数値である。

## 5.9 結論

本研究では実環境5Gのリアルタイム通信性能について、遠隔コラボレーションを想定したWebRTC計測ツールを用いて詳細に計測を行った。従来、実環境5Gの計測はできるだけ理想的な環境がセッティングされた状態でPLTやPing RTT、iperfといった一般的なネットワーク品質計測ツールを用いた計測が主流であったが、本研究では実環境の不安定な5Gに対して、遠隔コラボレーションを想定した特殊な計測を適用したことによって、より現実環境でのユースケース創出に向けた問題解決に必要な個別具体の知見を提供できたことが主な貢献である。

今後の展望としては、本研究で実装・使用したWebRTC計測ツールのOSS化や、本研究で取得した膨大なデータセットを機械学習等の定量的アプローチに適用可能なデータセットとして公開するほか、本研究では利用に至らなかったリアルタイムスペクトラムアナライザを用いたエリア測定データとの統合が挙げられる。また、計測というアプローチとは異なるものの、本計測によって有効性が示唆された車載WebRTC通信におけるマルチパス技術の併用なども、取り組む意義が大きい実装課題であると考えられる。

## 第6章 その他の活動

- 塚田学, "メタバース実現に求められるデジタルインフラの課題と要件", 第6回「Web3 時代に向けたメタバース等の利活用に関する研究会」, 14.12.2022. [63]
- 塚田学, "[招待講演] メタバースのためのメディア相互運用基盤", Archi Future 2022, 東京・有明TFT ホール, 28.10.2022. [64]

- CREST Internet of Realities プロジェクトへの参画

---

---

## 第7章 まとめ

---

---

本報告書では、2014年より開始したSDMコンソーシアムで進めて来た、視聴空間サービスのソフトウェア制御に関する研究として、2022年度に行なった活動(デジタルツイン、遠隔コラボレーション)について報告した。

SDMコンソーシアムでは、ソフトウェア処理による視聴空間の制御、映像音声を制御するネットワーク機器、インタラクティブ・ユーザインターフェイス、SDMプラットフォームを利用したコンテンツ作成など、共同研究活動に参加するパートナーを募集しています。

ご協力をよろしくお願いたします。