

## デジタルツイン連携におけるトポロジー管理手法の提案 A Proposal on Topology Management Method for Federated Digital Twins

杉山 敬三<sup>†</sup>  
Keizo Sugiyama

### 1. はじめに

筆者らは、デジタルツイン(以下、DT)を用いて、サイバー攻撃のフィジカル空間への影響を評価しセキュリティ対策を支援するサイバー・フィジカル連携型セキュリティ対策基盤<sup>[1]</sup>を提案している。本基盤では、モビリティや人流管理など本来の目的に応じて構築される DT とセキュリティ対策を行う DT が連携して動作する。このようなデジタルツイン同士が連携する形態は Federated Digital Twin(以下、FDT)とも呼ばれ、研究開発が進められている。

FDT は、システムが大規模化する際に新たな DT を追加しやすくなりスケラビリティが向上することや、多段で構成される場合に各段で異なる詳細度のモデルを持つことでより精度の高いシミュレーションや分析が可能になるなどのメリットがある。しかしながら、既存の FDT の検討においては、複数の DT を連携させる概念やアーキテクチャは提案されているものの、統合された DT を管理する具体的な処理は示されていない。

本稿では、FDT において、連携するコンテキストに応じて DT 間の接続関係である論理的なトポロジーを管理する手法を提案する。

### 2. Federated Digital Twin に関する検討状況

以下では、FDT に関する研究および標準化動向を示す。

文献[2]では、個々の DT をネットワーク化して物理オブジェクトと仮想ツイン間のマッピングを多対多とする DT ネットワークの概念を定義し、製造業やヘルスケア、6G ネットワークなどへの応用例が示されている。文献[3]では、異なる分野・場所同士の DT から得られる知識を共有するために、複数の DT が垂直方向や水平方向に連携するアーキテクチャを提案し、通信やコンピューティング、AI における技術課題を提示している。文献[4]では、様々な種類のアプリケーションで DT を構築する際のトポロジーについて 6 つのカテゴリーを示しており、そのうち集約型デジタルツイン (Aggregated DT) はツリー構造による DT 間の親子関係を表している。標準化では、ITU-T の SG20 においてスマートシティを対象に FDT のための参照アーキテクチャ [5]と要件 [6]を規定している。また、ITU の FG-MV(Focus Group on metaverse)では、DT を利用するメタバース間の相互接続のためのアーキテクチャの検討を行った [7]。しかしながら、いずれにおいても、DT が多段に連携して統合的な管理を行う場合の具体的な処理は検討されていない。

### 3. デジタルツイン連携におけるトポロジー管理手法の提案

#### 3.1 トポロジー

DT 間連携における接続形態を表すためのトポロジーでは、ノードは DT、リンクは DT 間の接続関係に相当する。

本提案では、図 1 に示すように、所要の目的に応じて構築される個別の DT (以下、個別 DT) 群と、それらと連携して動作する上位の DT (以下、上位 DT) との間のトポロジーを扱うものとする。この場合、ルートノードに相当する上位 DT が葉ノードに相当する個別 DT を 1 個以上持つ N 進木 (以下、DT ツリー) によるツリー型のトポロジーとなる。また、階層構造を構成し、DT ツリーのルートノードに相当する最上位 DT が中間ノードに相当する個別 DT との連携を、中間の個別 DT が上位ノードとして葉ノードに相当する下位の個別 DT との連携を管理するような多段のトポロジーにすることも可能である。

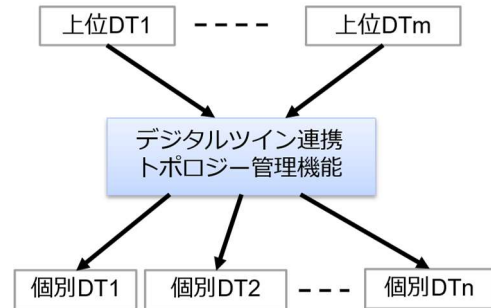


図1 デジタルツイン連携におけるトポロジー管理

#### 3.2 コンテキスト

コンテキストとは、複数の DT が連携する目的とその連携に必要な処理を示したものであり、連携対象となる上位 DT と個別 DT の間で事前に合意されているものとする。特定のコンテキストにおいて上位 DT の個数は一つとなるが、同時に複数のコンテキストを扱う場合には、一つの上位 DT において同時に複数の異なる DT ツリーを構築することができる。以下にコンテキストの例を 2 つ示す。

##### (1) セキュリティ対策

複合商業施設のような特定のエリアにおいて、モビリティ管理 (個別 DT1)、ビル設備管理 (個別 DT2)、人流管理 (個別 DT3) といった 3 つの個別 DT が各々サービスを提供し、それらの上位 DT が個別 DT1~個別 DT3 のセキュリティ対策を支援するコンテキストである。これら DT が連携する目的はセキュリティ対策であり、上位 DT と個別 DT 間では脆弱性情報や脅威情報などを授受し、エリア全体のセキュリティ対策に反映する。

##### (2) 連合学習

異常検知を行うための機械学習のモデルを構築する際に、上位 DT をサーバとし、機械学習の対象となるデータセットを局所的に持つ個別 DT をクライアントとするコンテキストである。DT が連携する目的は連合学習 (Federated Learning) であり、例えば提携している類似の個別 DT 間で機械学習モデルを作成する際に、上位 DT にデータを集約することなく、何らかの基準で選択された個別 DT 群と上位 DT の間でパラメータを授受し、個別 DT のデータを秘匿したまま共同のモデルを構築することができる。

### 3.3 トポロジー管理手法

DT 連携におけるトポロジー管理機能は、図 2 に示すように、①個別 DT 連携管理部、②トポロジー管理部、③個別 DT プール管理部、の 3 モジュールから構成する。また、上位 DT、及び、個別 DT との通信には、Pub/Sub やメッセージブローカなど、既存のプロトコルを用いる。

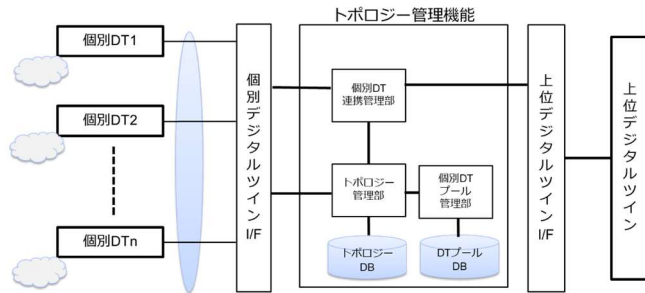


図 2 トポロジー管理機能の構成

#### 3.3.1 個別 DT 連携管理部

個別 DT 連携管理部は、コンテキストに応じて、上位 DT と個別 DT 間でメッセージの授受を行う。

個別 DT 連携管理部が上位デジタルツイン I/F を介してメッセージを受信した場合、当該メッセージにはペイロードと当該メッセージのコンテキストを示すコンテキスト識別子とを必須パラメータとして、メッセージの送付先となる個別 DT 識別子を任意パラメータとして含むものとする。メッセージに個別 DT 識別子が含まれる場合、トポロジー管理部に対し当該メッセージに含まれるコンテキスト識別子と個別 DT 識別子をパラメータとする登録要求を発行する。個別 DT 識別子がメッセージに含まれない場合には、トポロジー管理部の保持するトポロジー DB を検索して、当該メッセージの送付先となる個別 DT 識別子を設定する。

個別 DT 連携管理部が個別デジタルツイン I/F を介してメッセージを受信した場合、当該メッセージにはペイロードと、当該メッセージのコンテキストを示すコンテキスト識別子とを必須パラメータとして、メッセージの送付先となる上位 DT 識別子を任意パラメータとして含むものとする。上位 DT 識別子がメッセージに含まれる場合、トポロジー管理部に対し当該メッセージに含まれるコンテキスト識別子と上位 DT 識別子をパラメータとする登録要求を発行する。上位 DT 識別子がメッセージに含まれない場合には、トポロジー管理部の保持するトポロジー DB を検索して、当該メッセージの送付先となる上位 DT 識別子を設定する。

#### 3.3.2 トポロジー管理部

トポロジー管理部は、最新の DT ツリーのトポロジーを決定しトポロジー DB に管理する。

トポロジー管理部が個別 DT 連携管理部から受信する要求が登録要求の場合、トポロジー管理部はコンテキスト識別子に対応する DT ツリーを検索し、未登録の場合は当該 DT ツリーのノードとして DT 識別子を登録する。対応する DT ツリーが存在しない場合には、トポロジー管理部は当該コンテキストに対応する DT ツリーを生成する。

トポロジー管理部が個別 DT 連携管理部から受信する要求が検索要求の場合、トポロジー管理部はコンテキスト識別子に対応する DT ツリーを検索し、対応する DT ツリーが存在する場合にはコンテキストに応じた DT を選択し、

その DT 識別子を個別 DT 連携管理部に伝達する。ここで、コンテキストにより DT の選択基準は異なる。例えば、3.2(1)のコンテキストの場合、上位 DT からのメッセージ受信であれば、当該エリア内でセキュリティ管理の対象となる個別 DT1～個別 DT3 のいずれかの個別 DT となり、個別 DT からのメッセージ受信であれば上位 DT となる。

#### 3.3.3 個別 DT プール管理部

個別 DT プール管理部は、トポロジー管理の対象となる個別 DT のうち、連携処理が行われておらず DT ツリーに登録されていない状態の DT に関する情報をトポロジー管理部に提供する。これにより、必要性が生じた時に迅速に DT 連携の対象に加えたり、連携の必要がない場合には接続対象を必要最小限に絞りリソースやコストを削減したりすることができる。

トポロジー管理部と DT プール管理部間のやり取りは、問い合わせの 1 種類となる。DT プール管理部では、トポロジー管理部からの問い合わせに基づき、DT プール DB 内に存在する DT 群からコンテキスト識別子に対応する個別 DT を選択し、選択された個別 DT 識別子をトポロジー管理部に伝達する。初期状態は連携可能であるすべての個別 DT が管理対象となる。

## 4. おわりに

本稿では、複数のデジタルツイン間の連携において、所要の目的に応じて構築される個別 DT 群と、それらと連携して動作する上位の DT との間で、連携するコンテキストに基づいたツリー構造のトポロジーを管理する手法を示した。本手法により、一つの上位 DT が複数のコンテキストを使い分けながら同時に異なる連携を行う際の個別 DT の管理が容易になる。また、特定のコンテキストにおいて最適なトポロジーを自動選択したり、異なるコンテキストを動的に認識して必要に応じてトポロジーの変更や適応を行うなどの応用が考えられる。

### 謝辞

本研究成果は、国立研究開発法人情報通信研究機構 (NICT) の委託研究 (JPJ012368C08101) により得られたものです。

### 参考文献

- [1] 杉山他, "サイバー・フィジカル連携型セキュリティ基盤におけるデータ連携機能の基本設計", 第 86 回情処全大 4D-05(2024)
- [2] Vergara et al, "Federated Digital Twin", IEEE/ACM 27th International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications (DS-RT), 2023
- [3] Yu et al, "Internet of Federated Digital Twins (IoFDT): Connecting Twins Beyond Borders for Society 5.0", IEEE Internet of Things Magazine, vol.7, no.5, pp.64-71, 2024
- [4] Schroeder et al, "Digital Twin connectivity topologies", IFAC-PapersOnLine, Vol.54, Issue 1, pp.737-742, 2021
- [5] ITU-T Recommendation Y.4489:2023, "Reference architecture of digital twin federation in smart cities and communities",
- [6] ITU-T Recommendation Y.4224:2023, "Requirements for digital twin federation in smart cities and communities"
- [7] 杉山他, "メタバース間相互接続に基づくサイバー・フィジカルセキュリティのユースケースに関する検討", 2024 年電子情報通信学会ソサイエティ大会 B-7-15