

マルチフォーマット3Dデータ統合 の実装と応用

クロスデバイス商用メタバースプラットフォーム

井原正則
株式会社クラ
スター
東京、日本
m.ibara@cluster.mu

廣井 雄一
クラスターメタバー
スラボ
東京、日本
y.hiroi@cluster.mu

カムガイ 拓志
株式会社クラ
スター
東京、日本
t.kamegai@cluster.mu

平木 武文
筑波大学茨城県
クラスターメタバー
スラボ東京、日本
hiraki@slis.tsukuba.ac.j

P

要約 - 従来、BIM や CAD などの特殊な 3D 設計データは、選ばれた専門家グループのみがアクセスできるため、一般ユーザーが意思決定プロセスに参加することを妨げる大きな障壁が生じていました。本稿では、商用クロスデバイスメタバースプラットフォームであるClusterにおける産業用メタバースの実装事例を提示することで、産業領域や建築領域における3Dデータの活用に関する実践的な洞察を体系的に概観する。本稿では、産業・建築分野における主要なデータフォーマットの特徴と制約を分析し、メタバースに向けた統合ワークフローを整理する。複数の領域にまたがる3次元データを活用した応用事例を通じて、メタバースとデジタルツイン技術の融合による協働意思決定支援の実践例を紹介します。具体的には、マルチデバイスアクセスと同時マルチユーザー参加機能が、従来の専門家依存システムでは実現が困難であった産業用メタバースにおける民主的な環境を促進することを実証します。

インデックス用語

産業用メタバース、デジタルツイン、マルチフォーマットデータ統合、共同意思決定支援、マルチデバイスアクセス

一. 紹介

デジタルツイン技術の普及に伴い、多くの組織が3Dデータの利用拡大を目指しています[1]。しかし、技術者以外の人材がBIM(ビルディング・インフォメーション・モデリング)やCAD(コンピュータ支援設計)のデータを直感的に理解し、実際の現場業務における意思決定プロセスに参加することは依然として困難です。たとえば、建築設計では、ほとんどの利害関係者は図面を通じてのみ計画をレビューできます。防災計画では、住民は間取り図によってのみ避難経路を確認できます。また、産業施設の運用では、現場作業員は設計意図を理解するのに苦労しています。専門家と非専門家間の情報格差は、効果的なコラボレーションと民主的な意思決定を妨げる根本的な課題です。

メタバース環境は、複数のユーザーが直感的な操作で3D空間を共有し、特殊なデータを解釈できるようにすることで、この課題に対する効果的な解決策を提供します。さらに、リアルタイムのコミュニケーションとコラボレーションは、

専門家と非専門家が対等な立場で議論できる環境。

本稿では、Cluster1における産業用メタバースの実装事例から示されるように、産業領域や建築領域で3Dデータを活用するための実践的な洞察を体系的に概観する。累計ユーザー数3,500万人を超える「Cluster」は、スマートフォン、PCクライアント、VR-HMDなどのクロスデバイスサポートによる高いアクセシビリティを特徴とする日本最大のメタバースプラットフォームです。防災や建築設計支援など、さまざまな領域での導入経験を分析します。BIM、CAD、点群データなど、さまざまなデータ形式の処理ワークフローを明確にします。また、技術的な課題を解決するためのアプローチについても解説します。さらに、クロスデバイスメタバースアクセスがデジタルツインにもたらすメリットや、現在のメタバースプラットフォームの制約と可能性についても明らかにします。

この論文の主な貢献は3つあります。まず、異種の3Dデータ形式(BIM、CAD、点群、および禁止データ)をクロスデバイスメタバース環境に統合するための体系的なワークフローを提供します。第二に、メタバースベースの3Dデータ可視化が、多様なユーザーグループにわたるコラボレーションの意思決定をどのようにサポートできるかを、実践的な実装事例を通じて実証します。第三に、産業用メタバースアプリケーションを広く採用するために対処しなければならない技術的限界と研究課題を特定します。

二. 関連作品

メタバースプラットフォームは、ユーザーが仮想空間内で社会的に対話し、コンテンツを作成し、経済活動に参加できるようにする包括的なデジタルインフラストラクチャです。このセクションでは、メタバースプラットフォームとその潜在的な産業用途、デジタルツインとメタバーステクノロジーの統合、意思決定とユーザー

エクスペリエンスのための産業用メタバースの民主化
の概要を説明します。

1<https://cluster.mu/en>

一. メタバースプラットフォームと産業応用

一) VR 中心のプラットフォーム: VRChat と Horizon Worlds

は、没入型の高いアバターベースのコミュニケーションプラットフォームであり、クリエイティブコミュニティの育成に成功しています。ただし、仮想現実ヘッドセットに大きく依存しており、安定したインターネット接続を備えた高性能コンピューターが必要です[2]。そのため、現場作業員やスマートフォンユーザーなど、多様な利害関係者の参加を必要とする産業用途には適していません[3]。さらに、埋め込まれた属性情報を保持しながら BIM および CAD データをインポートする方法は確立されていません。これにより、セマンティック属性に基づく動的な相互作用と検証関数の実装が妨げられます。

二) ゲーム中心のプラットフォーム: Roblox、Fortnite Creative、Minecraft は、スケーラブルなゲームエンジンを備えたユーザー生成コンテンツのための優れたプラットフォームです。ただし、産業用途に必要なミリメートルレベルの精度と属性管理機能が欠けています。さらに、地形と機械設備の間の衝突を正確に検出することは大きな課題です[4]。

三) エンタープライズ向けのプラットフォーム: NVIDIA Omniverse は、高精度のシミュレーションとレンダリング品質のリーダーです。ただし、GPU クラスタと商用ライセンスに依存しているため、小規模プロジェクトやモバイルユーザーにとって大きなコスト障壁が生じる可能性があります。産業コンテキストにおけるメタバースアプリケーションの最近のレビューでは、よりアクセスしやすいエンタープライズソリューションの必要性が強調されています [5]。

四) 特殊なプラットフォーム:

医学教育およびアーキテクチャ固有のプラットフォームは、それぞれの分野に最適化されたユーザーインターフェイスを提供しますが[6]、[7]、アプリケーションのカスタマイズには長い開発時間が必要です。さらに、個々のユーザーにアプリケーション環境を展開する時間のかかるプロセスは、民主的参加の概念を損ないます。

二. メタバースとデジタルツインの統合による産業応用

さまざまな産業部門がメタバースとデジタルツインテクノロジーの統合を模索しています。Sai らは、メタバース環境におけるデジタルツインアプリケーションを 15 種類に分類し、その幅広い適用性を実証しました [8]。

設計および製造分野では、Tao et al. [9] と Mourtzis et al. [10] が、製品の設計と製造プロセスを最適化するためのデジタル ツイン フレームワークを提案しました。建設分野では、BIM と VR を連携させ、既存施設の VR モデルを迅速に生成し、

設計レビューに活用する研究も報告されています[11]。

防災・緊急対応訓練において、メタバースとデジタルツイン技術を融合させることで、危険な現実世界のシナリオを安全な仮想環境で再現することができ、緊急対応能力を高めることができる[12]。Lu ら[13]は、建物のBIMモデルを使用して、VRで地震後の屋内火災救助シナリオをシミュレートし、複雑な災害状況に対する訓練環境を作成するシステムを開発しました。Xu et al. [14] は、VR-

煙の拡散と有毒ガスの影響をリアルタイムで評価する機能を備えた、ベースの消防訓練シミュレーター。

都市インフラの監視や環境管理の応用も注目されています。Geらは、都市洪水管理のための都市洪水デジタルツイン(UFDT)フレームワークを提案しました[15]。UFDTは、多様なリアルタイムデータソースを統合するユーザー中心のシステムアーキテクチャを備えています。これにより、仮想空間での災害シミュレーション、マルチステークホルダーの共同介入、およびリスク予測が可能になります[16]、[17]。

三. デジタルツインによる意思決定支援とユーザーエクスペリエンス設計

デジタルツインとメタバーステクノロジーの融合には、単なる技術的な統合以上のものがが必要です。また、人間の意思決定と理解をサポートするユーザーエクスペリエンスを設計する方法の研究も含まれます。[18]は、オンライン公共プラットフォームとしてダブリン市のデジタルモデルを開発し、住民が都市空間を仮想的に探索し、都市計画の提案を評価できるようにする市民フィードバックシステムを提案しました。これらの取り組みは、人間とコンピューターの相互作用(HCI)アプローチを使用して都市計画情報を視覚化し、これまで理解できなかった人々がアクセスできるようにし、参加型の意思決定プロセスを促進します。

デジタルツインベースのユーザーエクスペリエンス設計は、スマートホームアプリケーションでも検討されています。Xue

らは「メタホーム」の概念を提案し、メタバース空間内のスマートホーム環境のデジタルツインを設計するための戦略について議論しました

[19]。建物の運用管理においても、リアルタイムの視覚化と意思決定支援の取り組みが報告されています。

Encyewらは、IoTセンサーからのデータをBIMモデルに統合するスマート

ビルディング用のデジタルツインを開発しました[20]。これらのモデルは、静的な構造情報と動的な環境データを統合的に可視化し、施設管理の意思決定をサポートします。

これらの研究は、デジタルツイン環境内で複雑なデータをわかりやすい形式で視覚化するHCIアプローチを示しています。これらの取り組みは、専門ではないユーザーが複雑な技術システムと対話できるようにする重要な基礎技術です。

三. クロスデバイスメタバースの利点とデジタルツインの統合

このセクションでは、産業領域に焦点を当てて、クロスデバイスメタバースとデジタルツインを統合する利点について概説します。

一. 使いやすさとアクセス

メタバース環境にデジタルツインを実装すると、従

来の専門家に依存するアプローチが根本的に変わります。最も大きな革新は、専門的な知識や設備を必要としない操作性です。専門家でなくてもBIMやCADなどの特殊な3Dデータを操作して理解できるインターフェースにより、技術的な障壁がなくなります。

この民主化は、特にクロスデバイスメタバースのサポートによる高いアクセシビリティによって達成されます。PC、タブレット、スマートフォンなど、さまざまなデバイスからアクセスできるため、ユーザーベースが広がり、特殊な機器が不要になります。従来のCADシステムでは必要とされていた高性能ワークステーションや特殊なソフトウェアライセンスなどの参入障壁を取り除き、一般的な民生用機器での使用を可能にします。

二. 没入型、具体化された体験

メタバース環境の利点の一つは、属性情報を使用して対話できることです。ユーザーは、ドアの開閉や座りなどのオブジェクト固有の機能を割り当てることで、仮想空間内でリアルな体験を得ることができます。これらの機能的な相互作用は、静的な3Dモデルの表示を超えた動的な空間理解を促進します。

さらに、アバターの具現化された体験を通じて、ユーザーは仮想空間内で物理的に移動および操作することができ、実際の行動感覚によく似た体験を実現します。このようなインタラクションは、建築空間や産業施設の理解において、従来の画面ベースの視覚化では達成できなかった空間認識を提供します。

三. コラボレーション環境

メタバーステクノロジーの本質的な価値は、マルチユーザーの同時アクセスと通信を可能にする機能にあります。これらの環境では、複数のユーザーが同時に相談や意思決定に参加できるため、従来のシングルユーザーCADシステムでは実現が困難だった共同作業が容易になります。クロスデバイスメタバースは特にリアルタイムの空間共有と音声通信を強化し、屋内および屋外のユーザーなど、地理的に分散した利害関係者間の効果的な合意形成を促進します。

四. データドリブンな開発効率

システム開発の観点から見ると、標準的なメタバース機能は、プロジェクト固有の顧客化の必要性を最小限に抑えます。これにより、コンポーネントグループの再利用と産業部門全体の効率的な水平展開により、迅速な導入とコスト削減が可能になります。

さらに、メタバースは包括的なユーザー行動分析を提供します。従来のCADシステムとは異なり、メタバース

プラットフォームは、動きのパターン、インタラクションの頻度、注目の領域、共同エンゲージメントの指標などの詳細な行動データを継続的にキャプチャします。これらの分析により、インターフェイスのどの要素がユーザーの問題を引き起こしているか、空間ナビゲーションが問題になる場所、およびどのコラボレーション機能が生産的な結果を生み出すかが明らかになります。開発チ

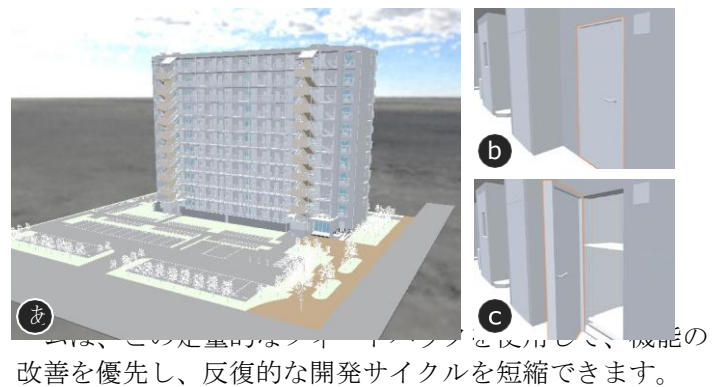


図1:BIMデータをクラスターに統合します。(a)
BIMデータから構築された3D空間。VR-
HMD、PC、スマートフォンなど、さまざまなデバイス
を使用して、複数の人が同時に空間にアクセスでき
ます。(b、c)BIMデータ内のドアは、クラスター内で対
話(開閉)できます。(モデル化
「マンション設計用BIM」、都市再生機構、日本⁴⁾)

五. 大規模なデータ統合と拡張性

メタバース環境のもう一つの重要な特徴は、大規模
な都市データを統合して使用できることです。Cesium
2やPLATEAU3などの公共地理情報システムと連携す
ることで、都市やインフラの規模で体験を提供するこ
とが可能になります。個々の建物から都市全体まで、
スケール間のシームレスな移行により、空間を包括的
に理解できます。

四. マルチフォーマットデータ統合パイプライン

産業領域や建築領域の3Dデータをメタバースに効
果的に統合することは、メタバース環境でのデジタル
ツインの実装における重要な技術的課題です。これら
のデータ形式には生成プロセスと目的が異なるため、
メタバース統合における利点と制約は大きく異なりま
す。ここでは、これらの領域の代表的な3Dデータを
メタバースに統合することのメリットとデメリットや
、データの特性に基づいたワークフローの処理につい
て解説します。

一. BIMの

BIMデータは、メタバースを統合するための最も有
利な形式です。その主な利点には、データを体系的に
整理し、材料、機能、寸法などの豊富な属性情報を建
築要素に割り当てることが含まれます。この属性情報
により、メタバース環境でのインタラクションの自動
生成が可能になり、開発効率が大幅に向上します。

ただし、設置コストが高いことが制約となります。
BIMモデリングには専門的な知識と時間が必要であり
、既存のプロジェクトではBIMデータを活用できない
ケースも少なくありません。

²<https://cesium.com/industries/smart-cities/> ³<https://www.mlit.go.jp/plateau/>

⁴https://www.ur-net.go.jp/rd_portal/UR-BIM/shugohbim.html

また、その適用範囲は建築に限られているため、産業機械・装置ではBIMデータと並行して他のデータ形式を使用する必要があります。

ClusterのBIMデータ統合ワークフローは次のとおりです(図1 a)。

一) **データインポート**: BIMデータは、ソフトウェアに依存しない汎用のインダストリーファウンデーションクラス(IFC)形式でインポートされます。IFC形式は、将来のツール互換性を維持することが期待されるオープンスタンダードです。Unityエンジンのインポートは、ifcOpenShell 5で提供されているIFC-to-gLTFコンバーターと、PLATEAU

プロジェクトで配布されているUPM(Unity Package Manager)統合パッケージを使用します。gLTF形式は軽量で汎用性が高いため、VR/ARなどのリアルタイムアプリケーションに適しています。

二) **マテリアルの置き換え**: IFCから派生したBIMモデルには適切なマテリアルやテクスチャが欠けていることが多いため、レンダリング負荷を軽減するために軽量シェーダーに自動的に置き換えられます。繰り返しテクスチャが事前に準備されているマテリアルも、属性に基づいて置き換えることができます。

三) **テクスチャ座標の生成**: メッシュにテクスチャ(UV)座標がない場合は、ワールド座標を使用してUV座標が生成されます。このプロセスにより、テクスチャが繰り返されるマテリアルの正確なレンダリングが保証され、視覚的な品質が大幅に向上します。

四) **インタラクティブ要素の統合**: 属性情報を使用したインタラクティブ機能の自動設定が実行されます。たとえば、ドア要素には開閉機構が自動で割り当てられ、椅子にはUnityスクリプトを介して座席機能が割り当てられます。BIM形状情報を分析して、可動部品のピボットポイントとユーザーインタラクション範囲を動的に計算します。

五) **レンダリング負荷の軽減**: 大規模な建物のレンダリングでは、レンダリング負荷が問題になります。そのため、オクルージョンカリング、GPUインスタンス化、バッチ処理などのUnityの標準的な最適化手法が適用され、レンダリングの負荷が軽減されます。

六) **メタバース環境のアップロード**: 最終モデルは、メタバースソフトウェア開発キット(SDK)を使用して、クラウドベースのメタバース環境に自動的にアップロードされます。このプロセス全体を1台のマシンで完了することで、シームレスで再現

性のあるパイプラインが作成されます。

二. カナダドル

CADデータは多くの産業分野で普及しており、メタバース環境で使用するために簡単に変換できます。機械設計や製品開発の標準であるため、既存のデータを活用できる可能性は大きいです。これは、産業用途の実装において重要な役割を果たします。

ただし、属性情報の欠如が大きな制約です。CADデータは幾何学的形状に焦点を当て、

[5https://ifcopenshell.org/](https://ifcopenshell.org/)



図2:ClusterにインポートしたCADデータを使用してモデルを組み立てます。(a) 一人称視点。各パーツは色分けされています。(b) 他のユーザーからの閲覧。複数のユーザーが協力して手順を学習したり、設計上の決定を下したりできます。(OSによるCADモデルVehicle Tabby EVO⁷)

多くの場合、機能や物質などの意味情報が欠けています。機械部品などの複雑な形状をメッシュに変換する場合にも、技術的な問題が発生します。これらの問題には、ローカル領域への過剰なメッシュ割り当てによるレンダリング負荷の増加やギャップの形成が含まれます。さらに、STEPやIGES形式などの中間形式を除き、さまざまな形式では変換に専用のソフトウェアが必要です。

Rhinoceros6 のデータなどの NURBS データをゲーミング メッシュに変換すると、厚みの不足やオーバーラップの問題により、技術的な問題が発生します。NURBS データからのメッシュ変換では、隙間や厚みのない表面が生まれることが多く、BlenderやMayaなどのDCC ソフトウェアを使用して手動で補正する必要があります。インタラクティブ要素の統合は、階層的なアクションと衝突検出が複雑であるため、基本的にケースごとに手動で行われます。

ClusterでのCADデータ統合ワークフローは次のとおりです(図2)。

- 一)データのインポート: CAD
データは、変換中のポリゴン数を最小限に抑える専用ソフトウェアを使用して FBX 形式に変換されます。ただし、NURBS や複雑な形状データでは、メッシュにギャップがあったり、厚みがなかったりすることがあります。これらのメッシュは、Blender や Maya などのデジタル コンテンツ作成 (DCC) ソフトウェアを使用して変更する必要があります。
- 二)材料置換/テクスチャ座標生成:BIMと同じです。
- 三)インタラクティブな要素の統合:
単純な反応動作ではなく、階層的に条件付けられたアクションと衝突検出を含むギミックと、

少数の要素と設定により、プロセスは基本的にケースごとに手動です。測定ツールなどの独立したギミックは、再利用可能なコンポーネントとして実装されています。

- 四)レンダリング負荷軽減/メタバース環境アップロード:BIMと同じです。



図3:Clusterにインポートされた点群データ。(a) ライカ BLK360 G2 でスキャンされた屋内点群データ、および (b) そのスキャン位置。(c) クラスタ内のメッシュによる再生。スマホからもアクセス可能です。

三. 点群

点群データの最大の利点は、3Dスキャン技術によって実環境からデータを即座に取得できることです。CADやBIMデータがない環境でもスキャンによる直接デジタル化が可能で、高い柔軟性を提供します。これは、改修や更新により設計図が現在の状況と一致しなくなった施設や、複雑な形状の既存の構造物に役立ちます。

ただし、重要な制約には、高い処理負荷が含まれます。点群データからメッシュを生成すると、コストがかかり、データの破損を修正することが困難です。また、複雑な形状の加工には分割が必要となり、労働力が増大します。さらに、高精度のスキャンには高価な機器と特殊な技術が必要です。

Clusterの点群データ統合ワークフローは次のとおりです(図3)。

- 一) **点群データ取得:** 点群データは、3Dスキャン技術を使用して実際の環境から収集されます。
- 二) **メッシュ生成:** 3Dメッシュモデルは、点群データから生成されます。
- 三) **モデル補正:** 生成メッシュの欠陥や欠落している部品は手動で補正されます。
- 四) **最適化処理:** メタバース環境でのレンダリング用のポリゴン数を削減および最適化します。

四. 公共都市データ

Cesium や PLAAUなどの都市データセットを使用すると、都市規模での包括的な3D環境の作成が可能になります。これらのデータセットは、個々の建物を超えた幅広い地域コンテキストでのデジタルツインの実装をサポートします。これらのデータセットは、政府機関によって管理されている公開データであるため、信頼性が高く、継続的に更新されます。

ただし、詳細レベルは地域によって異なります。地域によって、単純な白い箱で表現された建物から詳細な複製まで、品質が大きく異なります。

⁶<https://www.rhino3d.com/>

⁷<https://www.openmotors.co/product/tabbyevo/>

これにはガードレールや記念碑が含まれます。さらに、データ統合中に技術的な課題が発生します。たとえば、道路と地形の情報の間に不一致が生じたり、建物の高さが地形モデルと一致しなかったりする可能性があります。都市規模のデータは大量であるため、地形モデルの解像度を下げるなど、レンダリング負荷を最適化することが不可欠です。

以下では、PLATEAUの日本の公式都市データを例に、都市データをClusterに統合するプロセスについて説明します(図4 a)。

- 一) **範囲の選択とインポート:** PLATEAU
プロジェクト SDK
を使用して、必要な範囲を慎重に選択し、データをインポートします。まず、データの品質が使用目的と一致していることを確認します。
- 二) **データ補正:**
道路と地形情報の不一致や、建物グループの高さが地形モデルと一致しない場合には、手動補正が行われます。
- 三) **削減処理:** 不要なオブジェクトは削除されます。特に、上空の視点から見えなかったり、地形によって隠れていたりする建物は、レイキャスティングによって可視性を決定する専用のEditorScriptを使用して自動的に削除されます。

五. 導入事例

このセクションでは、Clusterでの3Dデータ統合とメタバーススペースのアプリケーションの実装に関するケーススタディを紹介します。リアルタイムのセンサー統合によるデジタルツイン機能の実証もあれば、3Dデータの共同活用に焦点を当てたケースもあります。各研究では、メタバース技術の利点を適用し、各アプリケーション領域でそれぞれ第III節と第IV節で説明したように、さまざまなデータ形式の処理技術を統合する方法を示しています。

一. 災害体験

Clusterでは、PLATEAUを使用して地形や建物を再現し、近くの構造物を高解像度でレンダリングすることで、川に洪水が到来する様子をリアルタイムで可視化しています(図4)。これにより、参加者は防災イベント中の被害シナリオを現実的な視点から体験することができます。地震・火災・水害災害避難用

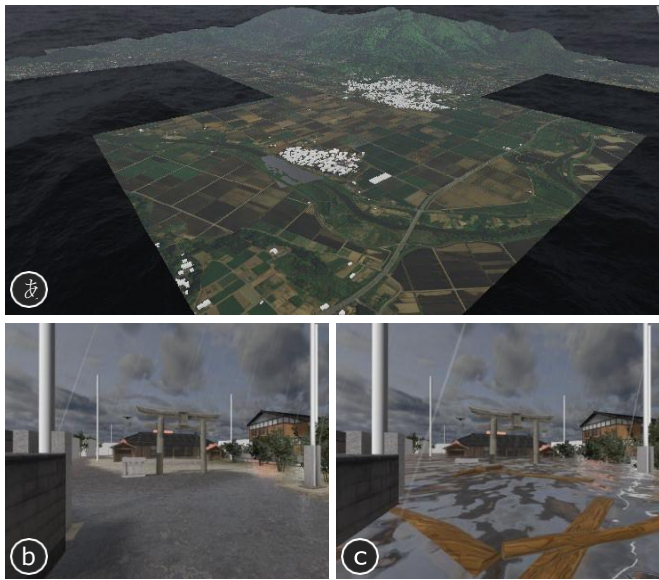


図4:Clusterで再現された都市の洪水シミュレーション。(a)PLATEAUから統合された都市の3Dデータ。洪水は標高に応じてシミュレートされました。(b、c)現実の人間の視点から見た洪水。

シミュレーションでは、参加者は仮想空間で適切なレベルの恐怖と状況の深刻さの認識を体験しながら、実際の避難経路を検証することができました。

このケーススタディでは、PLATEAU データと FBX アセットを組み合わせ、幅広い地理的および詳細な建築情報を活用しました。このアプローチは、従来の 2D 災害シミュレーションでは実現できない現実的で没入型の体験を提供します。参加者の防災意識を効果的に向上させました(Sec.III-E)。スマートフォンのアクセスにより、一般市民が専用の機器なしで参加できるようになり、防災教育の民主化に貢献しました(セクションIII-A)。

二. 避難訓練と経路最適化

BIMデータ統合処理技術(Sec.IV-A)を用いて、解析された建築情報に基づいて避難訓練シミュレーションを作成しました。例えば、学校での火災シナリオをシミュレートし、ヘルメットの携帯から屋外の安全エリアに到達するまでの全プロセスを再現します(図5)。メタバースでは、避難行動を追跡し、ユーザー一人ひとりの動きや視線方向の情報を収集し、経路のボトルネックを可視化しました。こうした仮想空間での高頻度の人間シミュレーションにより、物理的な訓練を繰り返すことなく、避難経路を最適化することができます。このアプローチにより、大規模な避難シミュレーションを安全に実施し、フィジカルトレーニングで再現することが困難な危険な状況を再現することができます。連携環境(Sec.III-

C)を用いて、収集したデータを統計的に分析(Sec.III-D)し、施設設計の改善や避難計画の最適化に活かしています。反復可能な仮想トレーニングにより習熟度が向上

避難手順で、継続的な設計の強化を促進します。

三. 設計意思決定支援

BIMデータをクラスターに統合し、BIM属性情報に基づいて、開閉などの相互作用を割り当てました(Sec.IV-A、図1b、c)。これにより、専門知識のない一般のステークホルダーやクライアントが、実際の行動を見ながら設計案を確認し、議論できる環境が整いました。

これにより、設計変更の場合でも、船舶や建物などの単発の製造品を低コストで高頻度で意思決定者に提示することが期待されます。巻尺などの現実的な測定ツールを追加すると、メタバース構築に利点があります。これらのツールにより、内部の詳細や、複数の人のための移動ルートやパスウェイの利便性と実現可能性を確認できます。没入型のインタラクションと具現化された体験(セクションIII-

B)を通じて、従来の描画ベースの確認では実現が困難だった直感的な体験である空間認識を促進します。これにより、設計の品質向上と利害関係者間の合意形成が促進されます。リアルタイムの共同レビューセッションにより、地理的に分散した利害関係者間の効率的な意思決定が可能になります(セクション III-C)。

四. CADを用いた作業シミュレーション

CADデータをクラスターに統合し(Sec.IV-B、図2)、組み立て、分解、加工操作を再現する相互作用を割り当てました。これにより、作業効率と教育効果が向上します。接触や危険な行動は、視覚的な警告を通じて安全かつ確実にユーザーに伝えることができます。同じスペースで複数の参加者によるリアルなトレーニングセッションも可能です。

産業訓練に実際の機器を使用することは、コストとリスクが伴います。しかし、メタバース環境では、具体化された体験(セクションIII-B)と危険な状況の安全なシミュレーションを通じて繰り返し練習することができます。作業手順の可視化、学習者と教員が同じ空間で協働すること(Sec.III-C)、行動データ分析に基づくフィードバックを提供することで、理解とトレーニングの効率が大幅に向上します(Sec.III-D)。

五. IoTセンサー統合による環境モニタリング

スマートオフィスのBIMデータ(Sec.IV-A)とIoTセンサーネットワークを連携させ、温度、湿度、CO2濃度、風速などの環境データをリアルタイムに反映するメタバース環境を構築しました[21](図6)。このケースは、リアルタイムのセンサーデータ統合による真のデジタルツインの実装を表しています。物理環境の変更は、約0.3秒の遅延で仮想環境と同期されます。これにより、色分けされた温度表示、数値空気質データ、効果音による風速情報などにより、環境条件を簡単に把握することができます。

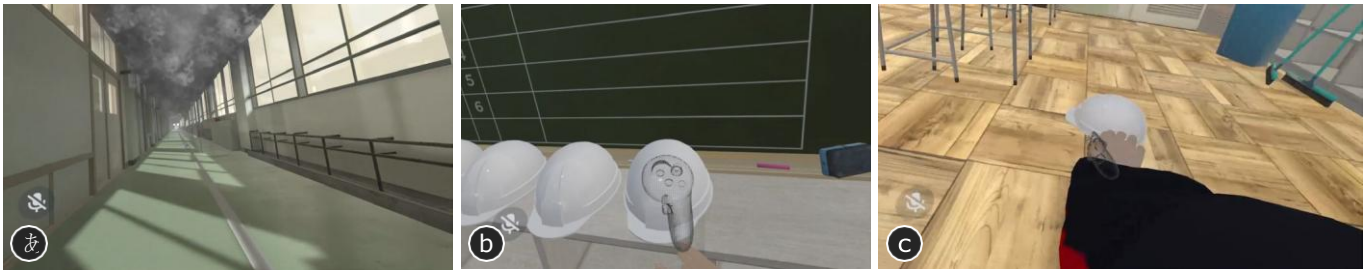


図5:Cluster内の校舎データを用いた避難訓練のシミュレーション。(a)煙の流れを複数人で確認し、よりリアルな状況を作り出すことができます。(b、c)参加者はヘルメットを保管している場所に行き、実際にヘルメットを手にするなどの身体的な行動を体験することができます。



図6:クラスター上のスマートビルディングのデジタルツインデモンストレーション[21](左)実際の建物内部、(右)同じ空間の仮想再現。右下図のように、空間の一部が赤色に着色され、温度やCO2濃度などのIoTセンサーからの情報が可視化されています。

メタバース環境では、従来の環境モニタリングシステムでは、数値的なダッシュボードによる数値確認のみを行うのに対し、複数のユーザーが3次元空間で同時に環境情報を共有し、リアルタイムの協議や意思決定を行うことができます(Sec.III-C)。遠隔地のユーザーは、物理的な施設と同じ環境条件を体験できるため、効率的な施設管理と省エネ戦略に関する共同の議論が促進されます。マルチデバイス対応により、スマートフォンによる環境モニタリングへの参加が可能となり、ファシリティマネジメントの民主化に貢献します(Sec.III-A)。

六. 機器搬送シミュレーション

点群データのクラスター統合(Sec.IV-C)により、既存設備の詳細な3Dモデルを再現し、設備搬送計画に対応できます。頻繁な機器更新により図面が最新のままだにならない環境でも、スキャンすることで最小限の労力で建設環境を検証できます (セクション III-D)。等身大

スペクティブにより、実際の作業環境を視覚化し、注意が必要な領域や危険をもたらす領域を事前に特定できます (セクション III-B)。

建設が完了すると、複数の人が仮想空間に参加して輸送手順を練習できるため、建設効率が向上し、リスクが軽減されます(セクション III-C)。

六. 技術的な制限と課題

産業用メタバースアプリケーションにおける根本的な課題として、実装経験から特定された技術的な限界や研究開発の課題を分析します。

一. 現在の技術的制約

最も根本的な制約は、民主化と専門化の間の固有のトレードオフです。マルチデバイスアクセスは参加の障壁を取り除きますが、システムの表現力と機能性も制限します。この問題は技術的な制限を超えており、メタバース空間のデジタルツインに固有の設計上の課題を提示しており、包括的な参加と高度な機能に対する矛盾した要件を満たす必要があります。

大規模な都市データ処理は、データの異質性と動的最適化の複雑さにより課題を引き起こします。PLATEAU都市データの品質変動は、単一の処理パイプラインでは対処できない根本的な問題を明らかにします。これは、標準化された処理方法と個別の最適化要件のバランスをとるという、スケーラビリティの中心的な課題を提示します。

異種データ統合における手動介入の普及は、現在のデータ形式間の意味的ギャップを明らかにします。BIM、CAD、点群、都市データは、技術形式、基本的な設計哲学、精度要件、および使用目的が異なります。これにより、統合プロセスは本質的に解釈的な作業になります。この課題を克服するには、技術的な自動化とデータモデルの概念的統合が必要です。

二. 技術開発の方向性

クラウドレンダリングとエッジコンピューティングは、アクセス表現のジレンマに対する有望なソリューションを提供しますが[22]、これらのソリューションは、遅延、帯域幅、およびコスト効率を含む新しいトレードオフをもたらします。真の解像度には、インテリジェント

な、

適応型品質管理と予測プリロードを組み合わせた分散アーキテクチャ [23]。

大規模言語モデル (LLM) の統合は、事前定義された対話の制限を克服する可能性があります

[24]。さらに重要なのは、文脈の理解とドメインの専門知識を統合する必要があることです。重要な進歩は、業界およびアーキテクチャ固有の専門知識をLLMに組み込み、メタバースアクションに対するユーザーの意図を正確に解釈するテクノロジーです[25]、[26]。

AIを活用したデータ統合は、単に処理効率を向上させるだけでなく、異種データ型間の意味関係を発見して統合することを目指す必要があります[27]。機械学習座標系に基づく認識や品質調整に加え、意味データの整合性を確保する知識表現技術の導入が必要です。

三. 今後の研究課題

この論文では、制御された実験的検証ではなく、実装の経験を紹介します。ユーザーエクスペリエンスの主張は予備的な観察に基づいており、検証のために正式なユーザビリティ調査が必要です。提示される技術ワークフローはクラスター

プラットフォームに固有であり、他のメタバース環境に一般化することはできません。

最も重要な学術的課題は、仮想空間で集合知が出現するメカニズムを解明することにあります。3D空間における多様な利害関係者が関与する意思決定プロセスは、従来の2D会議システムとは質的に異なる認知のおよび社会的ダイナミクスを示します[28]。したがって、これらのプロセスに対する空間配置、視覚的共有、および具体化の定量的な影響を調査する必要があります。

技術的な課題には、データの一貫性の確保と、リアルタイムの共同作業環境での競合の管理が含まれます [29]。状態の同期、競合の解決、履歴管理は、複数のユーザーが同時に

3Dデータを操作すると、空間的および時間的に複雑になります。これらの複雑さは、従来のデータベース技術の範囲を超えています。

産業用途における主な課題は、品質保証とトレーサビリティのメカニズムを確立することです[30]。メタバース環境からの設計上の決定やトレーニング結果を物理システムに適用するには、品質保証システムが必要です。これらのシステムは、仮想環境での行動と物理世界での結果との相関関係を検証し、エラーの伝播を防ぎ、責任の帰属を明確にする必要があります。

七. 結論

本稿では、クロスデバイスメタバースプラットフォームであるClusterによる産業用メタバースを構築することで、産業・建築分野で3Dデータを活用するための実用的なフレームワークを紹介しました。BIM、CAD、点群、PLATEAU都市データ用に統合ワークフローを体系化しました。このプロセスにより、各データフォーマットの特性に対応する最適化手法が明らかになりました。実

証された実装事例

メタバースとデジタルツインを組み合わせることで、民主的な参加を可能にし、従来の専門家依存のシステムを超える環境を構築できます。デバイス間のアクセスを通じて参加の障壁を排除し、共同で意思決定をサポートすることは、産業用メタバースの社会実装における重要なマイルストーンです。

このポジションペーパーは、メタバース環境で3Dデータを使用するための実践的なガイドラインを実務家に提供し、産業用メタバースを開発するための学術的基盤を確立します。これは、物理空間と仮想空間を統合する新しい共同環境への道を開きます。

承認

本研究は、JSTムーンショット研究開発プログラム助成金第JPMJMS2013号、JSTアパイル助成金第JPMJ AP2327号の助成を受けて行われました。

参照

- [一] W. クリッツィンガー、M. カーナー、G. トラーレ、J. ヘンジェス、および W. Sihn, "Digital twin in manufacturing: A categorical literature review and classification," *IFAC-PapersOnLine (16th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing)*, vol. 51, no. 11, pp. 1016–1022, 2018.[オンライン]. 利用可能: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896318316021>
- [二] V. Zhang, A. Albers, C. Saeedi-Givi, PO Kristensson, T. Bohne、および SK Tadeja, 「産業環境で拡張現実システムを評価する必要がありますか?教室と製造現場の設定がガイド付きアセンブリに及ぼす影響の調査」、*IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 30, no. 11, pp. 7042–7052, 2024 年。
- [三] R. マイオ、B. マルケス、A. サントス、P. ラマーリオ、D. アルメイダ、P. ディアス、BS Santos, 「バーベイス拡張現実を使用したインダストリー 4.0 組立ラインのリアルタイム データ監視: 第一印象」、*2023 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW)* で開催されました。IEEE、2023 年。
- [四] Z. Wang, X. Liao 他., "Digital twin simulation of connected and automated vehicles with the unity game engine", *2021 IEEE 1st International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPPI)* で。IEEE、2021年。
- [五] R. Kour, R. Karim, SN Venkatesh、および U. Kumar, 「産業文脈におけるメタバース - 包括的なレビュー」、*Frontiers in Virtual Reality*, vol. 6, p. 1488926, 2025 年。
- [六] Z. Tang, D. Zhuang, J. Zhang, 「ドメイン固有のデジタルツインプラットフォームの評価フレームワーク」、*Scientific Reports*, vol. 15, p. 10544, 2025年。
- [七] H. Arnarson, B. Solvang, and B. Shu, "The application of virtual reality in programming of a manufacturing cell," in *2021 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, 2021, pp. 213–218.
- [八] S. Sai, P. Sharma, A. Gaur, V. Chamola, 「メタバースにおけるデジタルツインの極めて重要な役割: レビュー」、*Digital Communications and Networks*, 2024 年。[オンライン]. 利用可能: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352864824001706>
- [九] F. Tao, J. Cheng, Q. Qi, M. Zhang, H. Zhang, and F. Sui, "Digital twin- driven product design, manufacturing and service with big data," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 94, 02 2018.
- [十] D. Mourtzis, N. Panopoulos, J. Angelopoulos, B. Wang, L. Wang, 「メタバースにおけるパーソナライズされた価値創造のための人間中心のプラットフォーム」、*Journal of Manufacturing Systems*, vol. 65, 653–659 ページ、2022 年。
- [十一] S. Heuser, L. A. Guevara Cano, W. Eyrich, and F. Pizarro,

"Digital twin, simulation: bim and virtual reality models for substation lifecycle in engineering, operation, asset management and maintenance," in *2022, IEEE PES Generation, Transmission and Distribution Conference and Exposition – Latin America (IEEE PES GTD, Latin America)*, 2022, pp. 1–6.

- [十二] S. Khanal, U. S. Medasetti, M. Mashal, B. Savage, and R. Khadka, "Virtual and augmented reality in the disaster management technology: A literature review of the past 11 years," *Frontiers in Virtual Reality*, vol. 3, p. 843195, 2022.

- [十三] X. Lu, Z. Yang, Z. Xu, C. Xiong, 「ビルディングインフォメーションモデルと仮想現実に基づく屋内地震後火災救助のシナリオシミュレーション」、*Advances in Engineering Software*, vol. 143, p. 102792, 2020 年。[オンライン]。利用可能: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965997819304673>
- [十四] Z. Xu, X. Lu, H. Guan, C. Chen, A. Ren, 「煙の危険性評価能力を備えた仮想現実ベースの火災訓練シミュレーター」、*Advances in Engineering Software*, vol. 68, 1–8 ページ, 2014 年。[オンライン]。利用可能: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096599781300166X>
- [十五] C. Ge と S. Q. 「都市洪水デジタルツインシステムフレームワーク」、*システム科学と制御工学*, vol.13, no.1, p.2460432, 2025年。[オンライン]。利用可能: <https://doi.org/10.1080/21642583.2025.2460432>
- [十六] D. Li, Y. Wen, Z. Shi, 「デジタルツインに基づくスマートシティ」、*計算都市科学*, vol. 1, no. 1, p. 4, 2021 年。
- [十七] G. White, A. Zink, L. Codeca', S. Clarke, 「市民フィードバックのためのデジタルツインスマートシティ」、*Future Generation Computer Systems*, vol.114, 560–573ページ, 2021年。
- [十八] G. ホワイト, A. ジンク, L. Codeca', および S. クラーク, 「市民フィードバックのためのデジタルツインスマートシティ」、*Cities*, vol.110, p.103064, 2021年。[オンライン]。利用可能: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264275120314128>
- [十九] C. Xue, Y. Gao, A. Robin, J. Du, Q. Xu, X. Fu, 「メタホーム:スマートメタパースの観点からのスマートホームデジタルツインデザイン」、*第11回中国CHI国際シンポジウムの議事録*, CHCHI '23。米国ニューヨーク州ニューヨーク: Association for Computing Machinery, 2024 年, p. 309–320。[オンライン]。利用可能: <https://doi.org/10.1145/3629606.3629635>
- [二十] D. D. Eneyew, M. A. M. Capretz, and G. T. Bitsuamlak, "Towards smart-building digital twins: Bim and iot data integration," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 130, 487–130, 506, 2022.
- [二十一] 増淵祐一、平木隆一、廣井祐一、井原正樹、松谷健一郎、財前正正樹、森田淳一郎, 「スマートビルディングの商用メタパースプラットフォームとIoTセンサーの統合によるデジタルツイン環境の開発」、*2025年IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW)*, 2025年, 852–855ページ。
- [二十二] N. Liu, T. H. Luan, Y. Wang, Y. Liu, Z. Su, 「メタパースにおけるQoc指向の協調VRレンダリングと動的リソースリス」、*IEEE Transactions on Mobile Computing*, 1–16ページ, 2025年。
- [二十三] S. チェン, B. ドウインカルジャブ, X. サン, L.-Y. ウェイ, S. ペトランジェリ, J. エチェバリア, C. Silva, and Q. Sun, "Instant reality: Gaze-contingent perceptual optimization for 3d virtual reality streaming," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 28, no. 5, pp. 2157–2167, 2022.
- [二十四] Y. Tang, J. Situ, A. Y. Cui, M. Wu, Y. Huang, 「拡張現実における Llm 統合: 現在の傾向、課題、将来の展望の包括的なレビュー」、*コンピューティングシステムにおけるヒューマンファクターに関する 2025 年 CHI 会議の議事録*, CHI '25 シリーズ。米国ニューヨーク州ニューヨーク: Association for Computing Machinery, 2025 年。[オンライン]。利用可能: <https://doi.org/10.1145/3706598.3714224>
- [二十五] 倉井亮, 平木 隆, 廣井 祐一, 平尾 祐一, M. Perusquia-Hernandez, 内山博樹、清川圭吾, 「MagicCraftの実装:商用メタパースプラットフォームのためのテキストからのインタラクティブな3Dオブジェクトとその動作の生成」、*第32回IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfacesの抄録とワークショップ*, 2025年, 1–2ページ。
- [二十六] E. Jeong, H. Kim, S. Park, S. Yoon, J. Ahn, and W. Woo, "Function- adaptive affordance extraction from 3d objects using llm for interaction authoring with augmented artifacts," in *2024 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct)*, 2024, 205–208ページ。
- [二十七] L. Schaub, I. Podkosova, C. Schö' nauer, and H. Kaufmann, "Point cloud to bim registration for robot localization and augmented reality," in *2022 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct)*, 2022, pp. 77–84.
- [二十八] Y. Yang, T. Dwyer, M. Wybrow, B. Lee, M. Cordeil, M. Billinghurst, および BH Thomas, 「没入型共同センシングに向けて」、*Proc. ACM Hum.-Comput. 相呼応する。*, vol. 6, いいえ。ISS, 2022年11月。[オンライン]。利用可能: <https://doi.org/10.1145/3567741>
- [二十九] L. Zhang, A. Agrawal, S. Oney, A. Guo, 「Vrgit: 仮想現実における共同コンテンツ作成のためのバージョン管理システム」、*ヒューマンファクターに関する 2023 年 CHI 会議の議事録*, コンピューティングシステム, ser. CHI '23。米国ニューヨーク州ニューヨーク: Association for Computing Machinery, 2023 年。[オンライン]。利用可能: <https://doi.org/10.1145/3544548.3581136>
- [三十] M. Belani, 「職業スキルトレーニングの媒体としての仮想現実の評価」、*コンピューティングシステムにおけるヒューマンファクターに関する2020 CHI会議の拡張要約*, CHI EA '20。米国ニューヨーク州ニューヨーク: Association for Computing Machinery, 2020 年, p. 1–8。[オンライン]。利用可能: <https://doi.org/10.1145/3334480.3375027>