

修士（工学）学位論文
Master's Thesis of Engineering

Unity アセットの投稿と QR コード閲覧を備えた
HMD 向け AR プрезентーションシステム
ARShow

ARShow: A AR Presentation System with Unity
Assets Upload and QR Codes Access for HMD

2026 年 3 月
March 2026

閻 永祥
YONGXIANG YAN

琉球大学
大学院理工学研究科
工学専攻
知能情報プログラム
Computer Science and Intelligent Systems
Engineering Course
Graduate School of Engineering and Science
University of the Ryukyus

指導教員: 赤嶺 有平
Supervisor: Prof. Yuhei Akamine

論文題目：Unity アセットの投稿と QR コード閲覧を備えた HMD 向け AR プレゼンテーションシステム ARShow

氏名：閻 永祥

本論文は、修士（工学）の学位論文として適切であると認める。

論文審査会

印
(主査) 國田樹

印
(副査) 副査1

印
(副査) 副査2

概要

本論文では、3D モデルと QR コードを統合し、HMD（ヘッドマウントディスプレイ）を通じて AR（拡張現実）空間での高度な可視化を実現するプレゼンテーションシステム「ARShowNode」と「ARShow」の開発、設計、およびその有用性について詳述する。AR 技術は現在、教育、マーケティング、娯楽など多岐にわたる分野で活用されているが、アクセシビリティとインタラクティブ性の高度な両立が依然として課題となっている。本研究では、制作者向けの「ARShowNode」プロジェクトと閲覧者向けの「ARShow」プロジェクトからなる双方向的なプラットフォームを提案し、Unity エンジンを基盤とした技術的仕様、アセットのアップロードとダウンロード、および 3D モデルの可視化プロセスについて論じる。

先行研究である「AR MUSE」などは、Android 端末を用いて 3D モデルと QR コードを紐付ける安価かつユーザーフレンドリーな解決策を提示した。これに対し、本研究の独創性は、出力デバイスとして HMD を採用することで没入感を飛躍的に向上させ、さらに 3D モデルと共に動的スクリプトを同時配信して実行可能にした点にある。これにより、従来の静的な展示に留まらない、複雑な挙動を伴うインタラクティブな AR 表現を閲覧者に提供することが可能となった。

システムの評価にあたっては、Unity 開発経験を有する制作者および一般の閲覧者を対象とした被験者実験を行い、システムユーザビリティの観点から定量的および定性的な分析を実施した。その結果、本研究で提案したシステムは高度な AR 展示の構築において、アクセシビリティに優れ、かつ表現力豊かな実用的ソリューションであることが実証された。

Abstract

This thesis discusses the development, design, and efficacy of ARShow, a presentation system for Head-Mounted Displays (HMDs) that facilitates the integration of 3D models with QR codes to enable advanced augmented reality (AR) visualization. While AR technology is currently employed across diverse fields such as education, marketing, and entertainment, the simultaneous achievement of accessibility and high-level interactivity remains a persistent challenge. This research proposes a bidirectional platform comprising a "curation side" for creators and a "viewer side" for audiences, detailing technical specifications based on the Unity engine as well as the processes for asset importation, exportation, and 3D model visualization.

The predecessor research, AR MUSE, offered an affordable and user-friendly solution for linking 3D models to QR codes via Android devices. In contrast, the novelty of the present study lies in the adoption of HMDs as the output medium to drastically enhance immersion, as well as the implementation of simultaneous distribution for "dynamic scripts" alongside 3D models. This allows for the delivery of interactive AR experiences involving complex behaviors that extend beyond conventional static exhibits.

The system was evaluated through subject testing involving both creators with Unity development experience and general viewers, with quantitative and qualitative analyses performed using the System Usability Scale (SUS). The results indicate that ARShow serves as an accessible, highly expressive, and practical solution for the construction of advanced AR exhibitions. This work aims to establish AR as a more accessible and powerful presentation methodology for creators utilizing 3D models globally.

研究関連論文業績

- 閻永祥, 赤嶺有平, “HMD と QR コードを活用した文化財展示向けの AR システム”
第 24 回情報科学技術フォーラム, K-003, E 棟 304, pp.495-498, 2025.

目次

第 1 章 はじめに	6
1.1 背景と目的	6
1.2 論文の構成	7
第 2 章 基礎概念	8
2.1 キュレーションの変遷と定義	8
2.1.1 博物館における伝統的役割	8
2.1.2 インディペンデントキュレーターの台頭	8
2.1.3 本研究における定義と課題	9
2.2 拡張現実技術	9
2.2.1 拡張現実の定義	9
2.2.2 ロケーションベース AR	9
2.2.3 マーカ型ビジョンベース AR	9
2.2.4 マーカレス型ビジョンベース AR	9
2.3 Unity 開発プラットフォーム	10
2.3.1 Unity (ユニティ)	10
2.3.2 Prefab (プレハブ)	10
2.3.3 AssetBundle (アセットバンドル)	10
2.3.4 MonoBehavior	10
2.3.5 UUID	10
2.3.6 Assembly	10
2.3.7 Meta ファイル	10
2.3.8 制約	10
2.4 Meta XR All-in-One SDK	11
2.4.1 パススルー機能	11
2.4.2 Meta XR Interaction SDK	11
2.4.3 Meta XR Voice SDK	11
2.4.4 Wit.AI	11
2.5 HybridCLR とホットアップデート	12
2.5.1 IL2CPP の技術的課題	12

2.5.2	HybridCLR の導入	12
2.5.3	AddComponent ベース更新	12
2.5.4	Asset ベース更新	12
2.6	静的なサーバ	13
2.6.1	xxx	13
2.7	クライアントとサーバ型の配信アーキテクチャ	13
2.7.1	システム構成	13
2.7.2	コンテンツの分離とオンデマンド配信	13
2.7.3	運用上の利点	13
第 3 章	関連研究	14
3.1	AR アプリケーションにおけるコンテンツの動的更新手法	14
3.2	クラウド統合型位置情報ベース AR コンテンツ共有システム	15
3.3	AR 展示におけるスクリーンリーダーおよび音声読み上げ技術の活用	16
3.4	博物館展示における AR インタラクション手法とデバイス特性の比較	17
3.5	XR 技術を活用した博物館および史跡における展示ガイドと地域活性化	18
3.6	ユーザの状態推定と行動ログ活用に基づく双方向的な AR 鑑賞支援	20
3.7	モバイル XR におけるリモートレンダリングと計算オフロード	21
第 4 章	提案システム	23
4.1	設計思想	23
4.2	開発環境	23
4.2.1	ハードウェア	24
4.2.2	ソフトウェア	24
4.3	システム構成	24
4.3.1	ARShowNode	25
4.3.2	ARShow	26
4.3.3	サーバ	27
4.4	UI とインタラクション	28
4.4.1	Node0: 複合的な AR 展示インターフェース	28
4.4.2	Node1: 映像コンテンツの空間配置	29
4.4.3	Node2: 3D モデル（文化財）の展示	29
4.5	ワークフロー	29
4.5.1	制作サイド（キュレーター）	29
4.5.2	鑑賞サイド（鑑賞者）	30
第 5 章	評価実験と考察	32
5.1	実験仮説	32
5.1.1	仮説 1	32
5.1.2	仮説 2	32

5.1.3 仮説 3	33
5.2 アンケート	33
5.3 被験者の募集	33
5.3.1 制作者	33
5.3.2 閲覧者	34
5.4 提案システム操作方式の紹介	34
5.4.1 制作者 (Creator) への操作説明	34
5.4.2 閲覧者 (Viewer) への操作説明	35
5.5 実験の流れ	35
5.5.1 実験プロトコル	35
5.5.2 グループ 1 (制作者 1 + 閲覧者 1・2)	35
5.5.3 グループ 2 (制作者 2 + 閲覧者 1・2)	36
5.6 実験結果	36
5.7 考察	36
第 6 章 まとめ	38
参考文献	40

図目次

表目次

第1章

はじめに

1.1 背景と目的

近年、博物館や美術館をはじめとする多様な文化施設において、デジタル技術を導入した展示手法が急速に普及している。特に、AR（拡張現実）技術を用いた空間芸術展示は、物理的な制約を超えた情報の提示や、現実空間とデジタルコンテンツが融合する新たな視覚体験を提供する手段として、その重要性を増している。このような動向の中で、特定の組織に属さず、独自のテーマや視点で展覧会を企画と構成する独立系キュレーターの活動が活発化しており、デジタル空間における展示設計の担い手も多様化している。

しかし、AR を用いたデジタル展示の現場では、運用面における大きな課題が浮き彫りとなっている。第一に、展示運営におけるコミュニケーションコストの増大である。AR 空間芸術のような専門性の高い展示では、キュレーターが鑑賞者一人ひとりに対し、アプリケーションの導入方法や操作手順を詳細に説明する必要がある。また、鑑賞者側もキュレーターごとに異なる独自の展示手法や操作体系をその都度理解しなければならず、これが円滑な鑑賞体験の障壁となっている。第二に、コンテンツの更新性と配布プロセスの硬直性である。従来の AR アプリケーション開発において、特に Unity 等のゲームエンジンを用いた iOS、Android、あるいは Meta Quest 等の HMD 向けビルトでは、セキュリティやプラットフォームの制約上、実行バイナリ自体の更新なしにプログラムの挙動（C#スクリプト）を変更することは極めて困難であった。このため、展示内容を柔軟かつ即時に反映させることができず、微細な修正であってもアプリケーション全体の再ビルトと再配布を余儀なくされていた。キュレーター自身がこの複雑な開発と更新プロセスに関与することは事実上不可能であり、結果として展示制作と運用の効率性が著しく損なわれている。

関連研究である「AR MUSE」等の既存システムでは、AssetBundle 技術を用いることで 3D モデル等の非コードアセットの動的読み込みを実現しているが、スクリプトロジックの更新には対応していない。そのため、インタラクションの振る舞いは事前にコンパイルされた範囲に限定され、動的な演出の追加やロジックの変更といったニーズに応えることができなかった。加えて、多くの既存システムはスマートフォン等のモバイル端末を対

象としており、空間芸術において重要な没入感の提供という点においても課題が残されている。

本研究の目的は、上述した課題を解決するため、HMD（ヘッドマウントディスプレイ）と QR コードを活用し、制作者としてのキュレーターと閲覧者としての鑑賞者の間を媒介する中間的なアプリケーション基盤 ARShow を提案および構築することである。

具体的には、以下の三つの目標を達成することを目指す。

第一に、アプリケーション本体の更新を一切必要とせずに、最新の展示内容とロジックを即時に公開かつ反映できる仕組みの構築である。本研究では、Unity 向けフレームワークである HybridCLR を導入することで、従来困難であったスクリプトレベルでのコードホットアップデートを実現する。これにより、キュレーターは自身の制作した 3D モデルやインタラクションロジックを迅速に配信可能となる。

第二に、展示会場におけるコミュニケーションコストの大幅な削減である。鑑賞者が会場に掲示された QR コードをスキャンするだけで、対応するコンテンツを静的サーバから即座にダウンロードし、実行環境へロードするワークフローを確立する。これにより、煩雑な操作説明やアプリの個別導入を不要とし、鑑賞体験の開始を円滑化する。

第三に、HMD を用いた没入感の高い AR 体験の提供である。ビデオシースルー機能を備えた Meta Quest 3 等の最新デバイスを活用し、Meta XR SDK を通じて現実空間とデジタルコンテンツをシームレスに融合させることで、空間芸術としての質を担保した鑑賞体験を実現する。

本研究を通じて、展示内容の更新がアプリケーションの再配布に依存しない柔軟な運用を実現する。キュレーターにとっては表現の自由度と制作効率を高め、鑑賞者にとっては手軽で没入感のある体験を提供し、新たなデジタル展示のプラットフォームを確立することを目指す。

1.2 論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。

第 2 章 基礎概念を述べる。

第 3 章 関連研究を述べる。

第 4 章 提案システムを詳細に説明する。

第 5 章 評価実験と考察を行う。

第 6 章 研究結論を纏める。

第 2 章

基礎概念

本章では、本研究が提案するシステム ARShow の設計および実装の基盤となる概念と技術的背景について述べる。まず、展示の主体であるキュレーターの役割の変化と、デジタル展示における課題を整理する。次に、その解決手段としての AR（拡張現実）技術の定義と分類について概説する。続いて、実装環境である Unity および Meta XR SDK の特性を述べ、本研究の核心技術である HybridCLR を用いたホットアップデート機構、およびシステム全体の運用を支える通信アーキテクチャについて詳述する。

2.1 キュレーションの変遷と定義

2.1.1 博物館における伝統的役割

伝統的にキュレーター（学芸員）は、博物館法や ICOM（国際博物館会議）の規定に基づき、資料の収集、保存、調査研究、および展示企画を専門的に担う職種として定義されてきた。博物館という制度的枠組みの中で、歴史的かつ芸術的価値を持つ資料を体系化し、教育的配慮のもとで公衆へ提示することがその主たる役割であった。

2.1.2 インディペンデントキュレーターの台頭

近年、特定の博物館組織に所属せず、独自の文脈とテーマ設定によって展覧会を構成するインディペンデントキュレーターの活動が顕著となっている。Obrist らが指摘するように、現代のキュレーターの役割は単なる管理や保存から、新たな意味を創出するプロデューサーとしての側面を強めている。彼らの活動領域は物理空間にとどまらず、デジタル技術を用いた空間表現にも及んでいる。

2.1.3 本研究における定義と課題

AR を用いた空間芸術展示において、キュレーターの役割は鑑賞体験全体の設計者へと拡張されている。しかし、高度なデジタル技術の導入は、鑑賞者に対するデバイス操作説明やアプリケーション導入支援といった、展示の本質とは異なるコミュニケーションコストの増大を招いている。本研究では、Unity における技術的背景を持つだけ、デジタル空間で展示構成を行い、鑑賞者へ体験を提供する主体としてキュレーターを定義する。

2.2 拡張現実技術

2.2.1 拡張現実の定義

拡張現実（Augmented Reality: AR）とは、実世界の情報にコンピュータ生成情報をリアルタイムに重畠し、人間の知覚を拡張する技術である。Azuma による定義では、以下の 3 要素を満たすものとされる。

- 1、現実と仮想の結合（Combines real and virtual）
- 2、リアルタイムなインタラクション（Interactive in real time）
- 3、3 次元的な位置合わせ（Registered in 3D）

2.2.2 ロケーションベース AR

GPS（全地球測位システム）や磁気センサ、加速度センサ等の位置情報を利用し、特定の地理的座標にデジタルコンテンツを配置する手法である。広域な屋外展示には適しているが、屋内における位置特定精度や、高さ方向の正確な整合（レジストレーション）に課題が残る場合が多く、精密な芸術作品の配置には不向きである。

2.2.3 マーカ型ビジョンベース AR

特定の画像（マーカ）をカメラで認識し、その特徴量に基づいてデジタルコンテンツの表示位置や傾きを決定する手法である。本研究では、AR コンテンツの識別子（ID）と空間的な配置基準点（空間アンカー）の両方の機能を併せ持つ QR コードをマーカとして採用する。これにより、鑑賞者は意図した作品を正確な位置で呼び出すことが可能となる。

2.2.4 マーカレス型ビジョンベース AR

特定のマーカを必要とせず、SLAM（Simultaneous Localization and Mapping）技術等を用いて周囲の環境形状をリアルタイムに解析し認識する手法である。本研究で使用する HMD（ヘッドマウンドディスプレイ）の Meta Quest 3 等最新デバイスでは、深度センサとカメラを用いた高度な空間認識が可能であり、壁面や床面を物理的な制約としてデジタルコンテンツに反映させることができる。しかし、この方式では計算量が多くて単なる HMD を用いてのリアルタイム性および安定性はマーカ型より劣っている。

2.3 Unity 開発プラットフォーム

2.3.1 Unity (ユニティ)

Unity は Unity Technologies 社が提供するリアルタイム 3D 開発プラットフォームであり、XR コンテンツ開発におけるデファクトスタンダードである。物理演算、レンダリング、オーディオ処理などの機能が統合されており、C# スクリプトによる柔軟なロジック記述が可能である。

2.3.2 Prefab (プレハブ)

Prefab は GameObject、コンポーネント (C# スクリプト)、およびプロパティ設定を一つのアセットとしてテンプレート化する機能である。これにより、展示作品を構成する複雑なオブジェクト群を一つの単位として管理し、動的に生成または破棄することが容易となる。

2.3.3 AssetBundle (アセットバンドル)

AssetBundle は Unity のアセットを実行時に外部からロード可能な形式でアーカイブする機能である。本研究では、1つの展示作品を1つの AssetBundle に対応させる設計を採用している。これにより、アプリケーション本体を更新することなく、サーバ上のアーカイブファイルを差し替えるだけでコンテンツを追加や更新することが可能となる。

2.3.4 MonoBehavior

2.3.5 UUID

2.3.6 Assembly

2.3.7 Meta ファイル

2.3.8 制約

標準的な Unity の仕様において、AssetBundle はテクスチャやモデルデータなどの非コードアセットの更新には適しているが、ロジック (C# スクリプト) の更新を含めることはできない。これは、インタラクションの挙動を変更したい場合にアプリ全体の再ビルドと再配布が必要となることを意味し、展示運営上の大きなボトルネックとなっていた。

2.4 Meta XR All-in-One SDK

2.4.1 パススルー機能

Meta XR SDK は、Meta Quest シリーズのハードウェア機能を Unity 上で制御するための開発キットである。特に本研究では、外部カメラで取得した現実映像に CG を合成するカラーパススルー機能を活用し、現実空間と展示コンテンツがシームレスに融合した AR（拡張現実）体験を構築する。

2.4.2 Meta XR Interaction SDK

Meta XR Interaction SDK は Meta XR All-in-One SDK に内臓され、ハンドトラッキングやコントローラ操作を抽象化し、標準的なインタラクションを提供するライブラリである。これにより、鑑賞者は「掴む」「指差す」といった直感的な身体動作で AR コンテンツを操作することが可能となり、没入感を阻害しない操作体系が実現される。

2.4.3 Meta XR Voice SDK

Meta XR Voice SDK は Meta XR All-in-One SDK に統合された音声認識モジュールであり、アプリケーションに対して音声入力インターフェースを提供するライブラリである。本 SDK は、マイクから取得した音声データの正規化やストリーミング処理を担い、後述する自然言語処理プラットフォーム Wit.AI との通信を仲介する役割を果たす。これにより、開発者は低レイヤーの音声信号処理を意識することなく、HMD 装着時のハンズフリー操作や、コントローラでは表現しきれない直感的な音声コマンド（作品解説の呼び出し、シーン切り替え等）を実装することが可能となる。

2.4.4 Wit.AI

Wit.AI は Meta 社が提供する自然言語処理（Natural Language Processing: NLP）プラットフォームであり、ユーザーの非構造化データ（音声やテキスト）を、コンピュータが処理可能な構造化データへと変換するクラウドサービスである。本研究において、Wit.AI は 鑑賞者の発話意図を解析し、具体的な操作命令へと変換する核心的なエンジンとして機能する。Wit.AI の処理プロセスは主に以下の要素によって構成される。

1. Intents (インテント)

インテントは、ユーザーの発話が「何をしようとしているのか」という意図を定義したものである。例えば、「解説を再生して」や「次の作品へ移動」といった発話に対し、それぞれ PlayDescription や MoveToNext といった識別子を割り当てる。システムは返却されたインテント識別子に基づき、実行すべき C# メソッドを決定する。

2. Entities (エンティティ)

エンティティは、発話に含まれる具体的なパラメータや変数を抽出するための定義である。例えば、「作品 A を見せて」という発話において、「見せて」はインテントであるが、

「作品 A」は操作対象を特定する重要な情報である。Wit.AI は事前に学習させたキーワードや文脈に基づき、このような固有名称や数値を抽出し、インテントに付随する引数としてアプリケーションへ返却する。

3. Traits (トレイト)

トレイトは、発話全体の意味合いやニュアンスを分類する機能である。肯定または否定の判定や感情分析などに用いられる。例えば、確認ダイアログに対する「はい」「いいえ」の応答判定などに利用され、より自然な対話フローの構築に寄与する。

これらの機能により、Wit.AI は単なる音声のテキスト化 (Speech-to-Text) にとどまらず、文脈理解 (Natural Language Understanding: NLU) を伴う高度なインタラクションを実現する。開発者は Web コンソール上でこれらの定義と学習を行うだけで、複雑な機械学習アルゴリズムを自作することなく、高精度な音声対話システムを構築可能である。

2.5 HybridCLR とホットアップデート

2.5.1 IL2CPP の技術的課題

Unity のモバイルおよび XR 向けビルド (Intermediate Language to C++: IL2CPP) では、C# コードが C++ へ事前コンパイル (Ahead-Of-Time: AOT) される。この仕組みにより高い実行性能が得られる反面、実行中に新たな C# コードを動的に読み込んで実行することは構造上不可能であった。

2.5.2 HybridCLR の導入

HybridCLR は IL2CPP 環境下において、AOT 実行とインタープリタ実行を混在させることで C# の完全なホットアップデートを実現する革新的なフレームワークである。これにより、コンパイル済みのバイナリ上で、サーバからダウンロードした DLL (アセンブリ) 内のメタデータと命令を解釈かつ実行することが可能となる。

2.5.3 AddComponent ベース更新

実行時にロードしたアセンブリ内のクラス情報を利用し、AddComponent メソッドを通じて既存の GameObject に新たなコンポーネント (ロジック) を動的に付与する手法である。これにより、アプリリリース時には存在しなかった全く新しい機能や振る舞いを作品に追加できる。本研究ではこの技術を採用することで、キュレーターが作成した複雑なインタラクションロジックを、AssetBundle の一部として鑑賞者アプリへ即座に反映させることを可能にしている。

2.5.4 Asset ベース更新

Prefab 内にシリализされたスクリプト参照を、実行時にロードした最新のスクリプトコードへと自動的に解決 (リマップ) する手法である。注意すべきなのは、スクリプト

をデシリアライズする際に同一 Unity プロジェクトで生成したメタファイルの解析する必要があるため、異なるプロジェクトからの Prefab が中身のスクリプト自動的にリマップ出来ないとなる。

2.6 静的なサーバ

2.6.1 xxx

2.7 クライアントとサーバ型の配信アーキテクチャ

2.7.1 システム構成

提案するシステムは、コンテンツを一元管理する静的ファイルサーバ、それを制作かつアップロードするキュレーター端ツール（ARShowNode）、および鑑賞者が利用するクライアントアプリ（ARShow）の三要素から成るクライアントサーバモデルを採用している。

2.7.2 コンテンツの分離とオンデマンド配信

展示作品の実体である AssetBundle は、アプリケーション内部には保持されず、外部サーバに配置される。クライアントアプリは QR コードの読み取りをトリガーとして、必要なデータのみをオンデマンドで取得し展開する。

2.7.3 運用上の利点

このアーキテクチャにより、鑑賞者のデバイスマトリージを圧迫することなく、無限に作品を追加することが可能となる。また、展示内容の更新はサーバ側のアーカイブファイル差し替えのみで完結するため、上文で述べた「更新プロセスの困難さ」および「コミュニケーションコスト」の課題を根本から解決する基盤となる。

第3章

関連研究

3.1 AR アプリケーションにおけるコンテンツの動的更新手法

博物館や美術館における AR 展示システムの運用において、展示内容の変更や追加に合わせてアプリケーションを柔軟に更新できることは極めて重要である。Ohlei ら [1] は、博物館の専門家がプログラミングの知識なしに AR ツアーを作成および編集できるシステムとして、Ambient Learning Spaces (ALS) フレームワークの一部である InfoGrid を提案している。このシステムは、Web ベースのポータルサイト (ALS Portal) とモバイル AR アプリ、そしてバックエンドシステム (NEMO) から構成される。彼らは、静的な画像や動画だけでなく、アニメーションやインタラクティブな挙動を含む 3D オブジェクトを動的に扱うために、Asset Collections と呼ばれる新しいオーバーレイタイプを開発した。これは Unity AssetBundle 機能を活用したもので、Unity エディタ用のアドオンツールを用いて作成されたモデルやテクスチャ、アニメーションなどのアセット群を、ランタイムでモバイルアプリにロードする仕組みである。InfoGrid アプリは、起動時に NEMO バックエンドからツアー情報を取得し、必要な Asset Collections を動的にダウンロードする。これにより、アプリ自体をアプリストア経由で更新することなく、展示物に対して動的な 3D コンテンツを追加したり、アプリ内の管理者機能で配置（移動や回転、拡大縮小）を調整したりすることが可能となる。彼らは自然史博物館における実証実験を通じて、このシステムが System Usability Scale (SUS) 86.04 という高いスコアを記録し、専門的な開発スキルを持たない博物館スタッフでも高度な AR ツアーの運用が可能であることを示している。

また、AR 展示制作のアクセシビリティ向上とコンテンツ配信の効率化に関して、Duanmu ら [2] は MUSE システムを設計および実装している。彼らの研究は、3D アーティストやキュレーターが、複雑な技術的障壁なしに自身の作品を AR 展示できることを目的としている。MUSE システムは、コンテンツ制作側の Unity Toolkit と、鑑賞者側の Viewer App からなる分離型アーキテクチャを採用している。Unity Toolkit は Unity エ

ディタ上で動作し、3D モデルのインポートからカスタマイズ、そして AssetBundle 形式へのパッキングまでを一貫して支援する。特に Config Generator 機能により、展示物のタイトルや説明、ファイル名などのメタデータを記述した設定ファイル (XML) を生成し、これをクラウドサーバー (Object Storage Service) にアップロードすることで展示構成を管理する。一方、Viewer App は Unity の AR Foundation を用いて開発されており、展示会場の QR コードをスキャンすることで、対応する設定ファイルを読み込み、サーバーから必要な 3D モデル (AssetBundle) をオンデマンドでダウンロードして表示する。QR コードは空間的なアンカーとしてだけでなく、コンテンツへのディープリンクとしても機能する。このアーキテクチャにより、設定ファイルを書き換えるだけで展示リストの更新やコンテンツの差し替えを行うホットフィックスが可能となり、鑑賞者用アプリの再配布を不要にしている。

これらの研究は、Unity の AssetBundle 機構とクラウド通信を組み合わせることで、アプリケーションのバイナリ更新を回避し、アセットレベルでの動的更新（ホットアップデート）を実現した成功例であると言える。次節では、こうしたコンテンツ更新の仕組みに加え、位置情報技術と統合することで体験を共有可能にするシステムについて述べる。

3.2 クラウド統合型位置情報ベース AR コンテンツ共有システム

前節で述べたコンテンツの動的管理に加え、近年では AR (Augmented Reality) や MR (Mixed Reality) 技術において、クラウドコンピューティングや高度な位置特定技術を統合することで、単一のデバイス内で完結していた体験を、複数のユーザー間で共有かつ持続させる試みが活発に行われている。特に、特定の場所に紐づいたコンテンツをクラウド経由で管理および配信するシステムは、文化遺産の保護、ユーザー生成コンテンツ (UGC) の普及、そして芸術鑑賞の深化といった多様な領域で応用が進んでいる。

Bekele [3] は 2021 年、バーチャルヘリテージ (VH) 分野において、クラウドコンピューティングと MR 技術を統合した Clouds-Based Collaborative and Multi-Modal MR システムを提案した。従来の MR アプリケーションはデバイスの計算リソースやストレージ容量に依存するため、高精細な 3D モデルやマルチメディアコンテンツの扱いに制約があり、またアプリケーション自体の長期的な保存や維持も課題であった。そこで Bekele らは、Amazon Web Services (AWS) と Microsoft Azure という異なるクラウドプロバイダーのサービスを複合的に活用するアーキテクチャを構築した。具体的には、Azure Spatial Anchors を用いて複数の HoloLens デバイス間で空間アンカー (Spatial Anchors) の識別子を共有し、Azure Cosmos DB および Azure App Service を介して同期することで、同一の現実空間におけるユーザー間の協調的なインタラクションを実現している。さらに、Amazon Polly による音声合成機能や Amazon S3 へのデータオフロードを実装することで、デバイスの負荷を軽減しつつ、文化財に関する多言語ガイドやリッチな視聴覚体験を提供可能とした。このアプローチにより、没入型技術を用いた文化学習における社会的プレゼンス (Social Presence) と仮想的プレゼンス (Virtual Presence) の両立が示された。

続いて 2023 年、Kidman [4] は、一般ユーザーが位置情報に基づくマーカレス AR コンテンツをその場で制作 (In-Situ Creation) し、共有するためのプラットフォーム ARtverse を開発した。既存の AR オーサリングツールは、QR コード等の物理マーカーに依存するか、あるいは Adobe Aero のように位置情報に紐づかない (Location-independent) コンテンツ生成に限られる傾向があり、現実世界の特定の場所に永続的なコンテンツを配置および共有する手段は限られていた。Kidman は、Unity と ARKit、そしてバックエンドに Google Firebase を採用し、クライアント・サーバー型のアプローチでこの課題解決を試みた。提案システムでは、ユーザーが配置した 3D アセットの情報だけでなく、その環境の空間特徴点マップ (ARWorldMap) をシリアル化してクラウドデータベースに保存する。これにより、別のユーザーが同一地点を訪れた際、保存された空間マップを読み込むことで、マーカレスでありながら正確なコンテンツの復元 (Relocalization) を可能にしている。また、GPS の精度誤差による位置合わせの困難さを軽減するため、コンテンツ作成時のカメラ映像 (スクリーンショット) をナビゲーションの手がかりとして提示するインターフェースを導入し、ユーザー生成型 AR 体験のアクセシビリティと再現性を向上させた。

さらに近年、飛田ら [5] は、美術館における対話型鑑賞を支援する目的で、VPS (Visual Positioning System) を活用したマーカレス AR アプリケーションを提案している。従来の対話型鑑賞は、ファシリテータを中心としたワークショップ形式で行われることが多く、時間的および空間的な制約により参加のハードルが高かった。彼らは、E コマースにおける商品レビューやレコメンデーションの概念を実空間の美術作品に適用し、鑑賞体験の非同期的な共有モデルを構築した。本システムでは、鑑賞者が作品に対して宝石を模した AR オブジェクトを配置し、感想コメントを紐付けることができる。これらはクラウド上で管理され、他の鑑賞者は探索モードを通じて他者の残したコメントを閲覧し、多様な視点からの鑑賞を楽しむことが可能となる。技術的には、物理的なマーカーを設置せず、VPS 技術によって高精度な位置認識を行うことで、作品や展示空間の美観を損なうことなく情報の重畠を実現している。実証実験においては、自分の感想を即時的に記録および共有できる点や、他者のコメントを通じて新たな気づきが得られる点が評価されており、ICT を活用した新たな鑑賞支援手法としての有効性が示唆されている。

このように、クラウドと位置情報を活用したシステムは、体験の共有という側面で大きな可能性を示している。しかし、すべての来館者が視覚的な情報のみで展示を楽しめるわけではない。次節では、視覚情報に依存しないアクセシビリティ技術の統合に関する研究動向を確認する。

3.3 AR 展示におけるスクリーンリーダーおよび音声読み上げ技術の活用

博物館や美術館の展示において、視覚情報に依存しない情報伝達手段として、スクリーンリーダーや音声読み上げ技術を AR システムに統合する試みが行われている。

Guedes ら [6] は、博物館におけるアクセシビリティの向上を目的として、AR 技術と

スクリーンリーダーを統合したアプリケーション AIMuseum を開発した。本システムは、展示物に付与された QR コードを認識することで、関連するテキスト情報を取得し、Unity の UI Accessibility Plugin を用いて多言語で読み上げる機能を有している。これにより、視覚障がい者や読字障がい者を含む多様なユーザーが、展示物の詳細情報にアクセス可能となる。38 名の参加者を対象とした評価実験では、スクリーンリーダー機能（テキスト読み上げ）に対して 92% の参加者が非常に満足と回答し、高い受容性が示された。特に、読字困難な参加者からは、スクリーンリーダーが作品への集中を助けるとの肯定的なフィードバックが得られており、視覚情報と音声情報の融合が展示体験の質を向上させることができることが確認されている。

一方、伏田と赤羽 [7] は、従来の視覚偏重型 AR の課題に対し、音声による情報提示に特化した Onsei AR を提案している。彼らは、スマートフォンの画面越しではなく、実空間の展示物を直接鑑賞させることを目的とし、画像マーカー認識と連動して解説やパネルの内容を音声で読み上げる機能を実装した。複数の展示会における実証実験の結果、アンケートでは動画再生機能よりも音声読み上げ機能への関心が最も高く、「画面ばかり見ない体験が面白い」や「目の見えない人向けのアプリケーションとして活用できる」といった意見が寄せられた。しかしながら、展示パネルのテキストをそのまま読み上げるだけでは、単に読む労力を軽減する以上の体験価値を提供できていないという課題も浮き彫りとなり、コンテキストに応じた音声設計の重要性が示唆されている。

これらの研究は、AR 環境におけるスクリーンリーダーや音声読み上げ機能が、視覚障がい者へのアクセシビリティ支援だけでなく、晴眼者にとっても展示物への没入を阻害しない有効なインターフェースとなり得ることを示している。Guedes らのシステムはアクセシビリティの観点からスクリーンリーダーを必須機能として位置づけ、伏田らのシステムは鑑賞体験の質の観点から音声読み上げの有用性を実証しており、双方は補完的な関係にあると言える。こうした情報の提示手法に加え、ユーザーがどのようにシステムを操作するかというインタラクション手法も重要な要素である。

3.4 博物館展示における AR インタラクション手法とデバイス特性の比較

博物館や展示空間における AR (Augmented Reality) の活用において、来館者が展示物といいかに直感的かつ効果的にインタラクションを行うかは重要な課題である。従来の手持ち型デバイス (Handheld Device: HHD) に加え、近年ではヘッドマウントディスプレイ (Head-Mounted Device: HMD) やジェスチャ認識を用いた手法が模索されており、それぞれの特性や課題に関する研究が行われている。

Kyriakou ら [8] は、博物館における展示物の接触不可という制約に着目し、Natural Interaction (NI) を用いた AR システムを提案している。彼らは、多くの博物館において展示品が保護のためにガラスケース内に収められており、来館者が物理的に触れることができないという課題に対し、スマートフォンの画面を介した従来の操作ではなく、人間の自然な手の動きを利用したインタラクションの有効性を検証した。具体的には、市販のス

マートフォンを HMD ケースに装着し、Leap Motion コントローラを組み合わせることで、低コストながら素手で 3D レプリカを操作（掴むことや回転させること等）できるシステムを構築した。キプロスの博物館において 60 名の来館者を対象に実証実験を行った結果、参加者の多くは当初、タッチスクリーンやボタンといった従来の操作方法を期待していたため、システムの使用に平均して約 1 分の慣れ（トレーニング）を要した。しかし、システムの使用を自然で楽しいと感じることが示され、NI が文化遺産へのアクセシビリティ向上に寄与すると結論付けている。

一方で、普及している HHD と、没入感の高い HMD との間には、インターラクションパターンの設計において明確な差異が存在する。Liu ら [9] は、博物館のガイドツアーにおける HHD と HMD (Microsoft HoloLens 2) のインターラクションパターンの比較検証を行っている。彼らは、ローマ時代の遺跡を題材とした既存の屋外用 HHD 向け AR アプリ Spirit のコンテンツを HoloLens 2 へ移植する過程を通じて、両デバイスの技術的および体験的な違いを分析した。その結果、HHD で一般的である画面タッチや GPS による位置情報トリガーといった手法は、HMD におけるエアタップ (Air Tap) や SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) といった技術と単純に置換できるものではないことが明らかになった。特に、HMD では HHD のように画面上のテキストを読む体験が快適ではない点や、HoloLens 2 には GPS が内蔵されていないため屋外での広域ナビゲーションが困難である点などの課題が浮き彫りとなった。これらを踏まえ、彼らはデバイスの特性に応じたインターラクションパターンの再設計が必要であると論じている。

さらに、HMD を用いた AR アプリケーションを初めて利用する来館者が直面する課題について、Liu ら [10] は自然史博物館におけるクジラの骨格展示を用いたプロトタイプ開発とユーザビリティ評価を行っている。彼らは、HMD 特有の操作方法（ハンドメニューの呼び出しや視線入力など）が、未経験者にとって高いハードルとなることを指摘し、オンボーディング（導入指導）、データ収集、フィードバックの 3 段階からなる評価手法を提案した。HoloLens 2 を用いた実証実験の結果、参加者はアバターへの追従や展示情報の探索といったタスクを概ね遂行できたものの、一度学習したジェスチャ操作を忘れてしまう問題や、デバイスの視野角 (Field of View: FOV) の制限によりホログラムが見切れてしまうといったハードウェア由来の課題が確認された。また、評価者が横について安全を確保しつつ観察を行う手法の有効性が示され、HMD を用いた展示体験においては、初心者が操作学習に費やす時間を最小限に抑え、展示内容そのものに集中できるようなインターラクション設計と導入支援が不可欠であることが示唆されている。

3.5 XR 技術を活用した博物館および史跡における展示ガイドと地域活性化

博物館や史跡における展示体験の向上を目的として、MR (Mixed Reality) や VR (Virtual Reality)、AR (Augmented Reality) といった XR 技術の導入が進められている。これらの技術は、従来の物理的な展示と人間によるガイドの制約を補完し、来館者のエンゲージメントを高める手法として注目されている。

Hammady ら [11] は、博物館における従来のガイドサービスの役割を再定義し、MR 技術を用いたホログラフィック・バーチャルガイドシステム MuseumEye を提案している。彼らは、エジプト考古学博物館におけるツタンカーメン展示を対象に、Microsoft HoloLens を用いたシステムを開発した。本システムは、3D スキャンされた展示品やテキスト、画像などのマルチメディア情報を空間上に配置し、歴史的なアバター（バーチャルガイド）が来館者にストーリーテリングを行うものである。技術的な特徴として、MuseumEye は 5 つのインタラクションレベル（物理環境、物理的展示物、バーチャルガイド、バーチャル展示物、UI）を提供し、ユーザーはハンドジェスチャ（エアタップ）を用いて直感的に操作を行う。また、展示空間にゲーム性を取り入れた Knowledge Scale game を導入することで、来館者の能動的な学習を促進している。171 名の参加者を対象とした評価実験の結果、ガイド役 (Role of Guide) という構成概念が、システムの有用性 (Usefulness) や使いやすさ (Ease of Use) と、将来の利用意図 (Intention to Use) との関係を媒介する重要な要因であることが明らかになった。これは、MR ガイドが単なる情報提示ツールではなく、人間のガイドと同様に Pathfinder（先導者）や Mentor（助言者）としての役割を果たすことで、来館者の体験価値を向上させることを示唆している。一方で、HoloLens の視野角 (FOV) の狭さや、装着の不快感といったハードウェアに起因する課題も報告されている。

また、地域固有の文化財に対する理解促進と地域活性化（シビックプライドの醸成）を目的とした XR コンテンツの活用事例として、井上と長澤による研究 [12] が挙げられる。彼らは、神奈川県綾瀬市にある国指定史跡神崎遺跡を対象に、VR および AR コンテンツを制作し、その効果を検証している。神崎遺跡のような埋蔵文化財は、遺構が埋め戻されているため視覚的なイメージを掴みにくいという課題があった。これに対し、井上らは発掘調査データに基づき、環濠や竪穴住居を 3DCG で復元した。VR コンテンツ VR 神崎遺跡では、HTC Vive Pro を使用し、あえて自由移動ではなくカメラが自動で移動する方式を採用することで、VR 酔いの防止と操作に不慣れな利用者への配慮を行っている。さらに、現地での体験を強化するために開発された AR 神崎遺跡は、Unity と AR Foundation を用いて制作されたモバイルアプリケーションである。これは、史跡内の解説看板に設置された QR コードを読み取ることで、スマートフォンのカメラ映像に当時の集落の様子（環濠や住居）を重畠表示させるものである。これらのコンテンツを用いた実証実験の結果、参加者からは文化財のスケール感や位置関係の理解が深まったとの評価が得られ、地域住民のシビックプライド向上や観光資源としての魅力向上に寄与する可能性が示された。

以上の先行研究から、MR や AR を用いたガイドシステムは、展示物の視覚的な復元や情報付加により、来館者の理解と関与を深める上で有効であることが示されている。しかし、デバイスの視野角制限や操作性の学習コスト、あるいは現地への導入における運用上の課題など、解決すべき点も残されている。次節では、こうした一方的な情報提示を超え、ユーザーの行動や状態をシステムが理解し活用する双方向的なアプローチについて述べる。

3.6 ユーザの状態推定と行動ログ活用に基づく双方向的なAR鑑賞支援

博物館や展示施設における AR (拡張現実) 技術の活用は、単にデジタルコンテンツを一方的に展示空間へ重畠表示する段階を超え、ユーザの鑑賞行動や生体反応をシステム側が取得および分析することで、より質の高い双方向的な鑑賞体験を提供するフェーズへと移行している。

Hou ら [13] は、Microsoft HoloLens を用いた博物館向けの AR 鑑賞アプリケーションにおいて、ユーザのインタラクション情報をシステムが収集し、それを展示表現に還元する仕組みを提案している。本システムでは、展示物に対する解説テキストや 3D モデルの表示といった基本機能に加え、視線入力 (Gaze) やジェスチャ、音声コマンドといったマルチモーダルな入力をサポートしている。特筆すべきは、将来のデータ分析のためにユーザの仮想情報に対する操作を記録するタスクが設計されている点である。具体的には、先行する来館者のインタラクション履歴 (クリック数) をシステムが蓄積し、そのデータに基づいて展示タイトルの明るさ (Lightness) を変化させる機能が実装されている。これにより、システムはユーザからどの展示項目が注目されているかという情報を取得し、それを視覚的なポピュラリティとして後続のユーザへフィードバックすることで、静的な情報提示に留まらない動的な展示空間を構築している。

モバイル端末を用いたアプローチにおいて、赤嶺ら [14] は、展示者側からの情報提供のみならず、来館者の個々の展示物に対する興味度や反応を推定することを目的とした双方向メディア型ガイダンスシステムを開発した。この研究では、タブレットやスマートフォン上で動作する AR 技術を用いながら、鑑賞者の動線や興味を推定する手法を組み込んでいる。システムはユーザの滞在時間や操作履歴といった行動データを取得および解析することで、ユーザが何に関心を持っているかを判断し、その興味に関連する類似の展示物を自動的に検索かつ提示する機能を備えている。これは、AR システムがユーザの状態を受動的に観測するだけでなく、取得した情報を能動的に活用して、個々のユーザに最適化された学習支援を行おうとする試みであると言える。

さらに近年では、高度なセンシング技術を有する HMD (ヘッドマウントディスプレイ) を活用し、より詳細なユーザ情報を取得および活用する研究が進められている。星野 [15] は、Meta Quest 3 を用いた AR 型遠隔学習支援システム AI Aquariumにおいて、デバイスに搭載された環境察知カメラや IMU (慣性計測装置) を用いて、ユーザの視点や頭の動き、位置情報を高精度に測定する手法を採用了。本システムでは、これらのセンシングデータに基づいて鑑賞視点の同期を図るだけでなく、閲覧ログ情報をユーザの興味関心を分析するための基礎情報として蓄積している。さらに、蓄積されたログデータと、オントロジーサーバによって構造化された知識情報を組み合わせることで、閲覧者の属性や過去の興味傾向に基づいた最適なコンテンツを提案する機能 (閲覧者属性によるコンテンツ提案機能および閲覧ログによる適正コンテンツ表示機能) の実装が試みられている。これにより、システムはユーザの無意識的な鑑賞行動からも情報を取得し、対話的かつ適応的な学習環境の形成を実現している。

以上のように、近年の AR 鑑賞支援システムにおいては、展示情報の提示という出力の

側面だけでなく、視線や動作、操作ログといったユーザ情報の入力と解析が重要な要素となっており、それらを活用した双方向的なインタラクションデザインが研究の潮流となっている。最後に、これらの高度な AR/VR 体験をモバイル環境で実現するための技術的課題である描画処理と計算オフロードに関する研究を紹介する。

3.7 モバイル XR におけるリモートレンダリングと計算オフロード

モバイル VR デバイスにおける描画性能の制約と、クロスプラットフォーム開発のコスト削減を目的として、Seligmann [16] は、Web ベースの VR クライアントを用いたリモートレンダリングシステムを提案している。従来の VR アプリケーションはデバイスごとに異なる API や SDK への対応が必要であり、開発コストが増大するという課題があった。これに対し、Seligmann は Web ブラウザ上で動作するフレームワークである A-Frame と、WebRTC によるリアルタイム通信を組み合わせることで、特定のハードウェアに依存しない汎用的なクライアントシステムを構築した。提案システムでは、Unity で構築されたサーバー側でレンダリング処理を行い、その結果を映像ストリームとしてクライアントへ送信する。また、レイテンシの影響を軽減するために、サーバー側で生成したカスタムキューブマップを用いる手法を採用した。評価実験では Oculus Quest をクライアントとして用いたが、動画のデコード処理やシェーダーの負荷により、滑らかな再生に必要とされる 60 fps を維持することが困難であり、デコード処理の最適化が課題として残された。

リモートレンダリングにおけるフレームタイミングの不一致とそれに伴う遅延の問題に対し、Kelkkanen [17] は、サーバーとクライアント間で厳密な同期を取る同期型リモートレンダリング (Synchronous Remote Rendering) アーキテクチャを提案している。従来非同期で行われていたレンダリングと表示のプロセスを同期させることで、フレームドロップやティアリングの発生を防ぎ、ネットワーク条件が良好な場合にはローカルレンダリングと同等の低遅延 (Local Latency Mode) を実現することを目指した。彼らは NVIDIA の GPU (GTX Titan X 等) が持つハードウェアエンコーダ (NVENC) を活用し、信頼性 UDP (RUDP) を用いた独自の通信プロトコルを実装した。実験では、LAN 環境および 50 km 離れたサーバーとのインターネット環境、5G ネットワーク環境下で評価を行い、有線 LAN 接続においては HTC Vive のネイティブ解像度と 90 fps のフレームレートで安定した動作を確認した。一方で、5G や不安定なネットワーク環境下では、遅延注入 (Delay Injection) や解像度の動的変更を行うことで、フレームレートの維持を図る必要性が示された。

さらに近年では、レンダリングだけでなく、計算負荷の高い認識処理をエッジサーバーにオフロードするエッジネイティブなアプリケーションも提案されている。Hammad ら [18] は、モバイル AR ゲームにおける身体動作認識の負荷をエッジコンピューティングで解決するシステム V-Light を開発した。モバイルデバイス単体では困難な、高精度な多人数姿勢推定 (OpenPose) をエッジサーバー上で実行し、その結果を用いてリアルタイムな AR シューティングゲームを実現した。V-Light のシステムアーキテクチャは、画像処理

パイプラインとゲームプレイパイプラインを分離し、画像データは Unity から Gabriel クライアントを通じてサーバーへ送信され、処理された姿勢データのみがクライアントへ返送される仕組みとなっている。これにより、帯域幅の節約と応答性の向上を図っている。彼らはこのシステムを通じて、計算負荷の高い処理をエッジへオフロードすることで、従来のモバイル AR では実現不可能であった身体性を伴う同期型マルチプレイ体験が可能になることを示した。

第4章

提案システム

4.1 設計思想

本節では、本研究で提案した AR 展示システムの設計思想について述べる。

本システムは、AR（拡張現実）を用いた芸術展示において、キュレーター（制作者）と鑑賞者の間に存在するコミュニケーションコストの削減、および展示コンテンツの持続可能な運用を解決することを主たる目的として設計された。従来のデジタル芸術展示、特にアプリベースの AR 展示においては、策展者が作品を公開するためにアプリケーションそのものを配布する必要があり、更新のたびに再配布や再インストールが求められるという課題があった。また、展示会終了とともにアプリのサポートが終了し、作品の鑑賞が不可能になるケースも散見される。さらに、鑑賞者にとっても、展示ごとに異なる操作方法や導入手順を学習する必要があり、これが鑑賞体験への障壁となっていた。

これらの課題に対し、本システムはキュレーターと鑑賞者を媒介するプラットフォームとしての役割を果たす。具体的には、Unity の AssetBundle 機能と HybridCLR によるホットアップデート技術を組み合わせることで、アプリケーション本体を更新することなく、展示コンテンツ（ロジックを含む）をサーバ経由で動的に追加や更新可能なアーキテクチャを採用した。策展者は、提供されるツールキットに従い AR 展品（Node）を作成し、サーバへアップロードするだけで、恒久的なアクセスが可能となる。一方、鑑賞者は単一のクライアントアプリ（ARShow）を使用し、会場の QR コードをスキャンするだけで、即座に該当する作品コンテンツをダウンロードし、鑑賞を開始することができる。この設計により、ハードウェアやアプリの更新に依存しない作品の永続性と、直感的かつ統一された鑑賞体験の両立を目指している。

4.2 開発環境

本節では、本システムの構築および動作検証に使用したハードウェアおよびソフトウェア環境について述べる。

4.2.1 ハードウェア

本システムの開発および実行には、コンテンツ制作とサーバホスティングを行う PC と、AR 体験を提供する HMD (Head Mounted Display) を用いた。開発用 PC には、Windows 11 Professional (25h2) を搭載したワークステーションを使用した。Windows 環境を採用した主な理由は、Meta Quest Link 機能を利用することで、実機へのビルドしてインストールを行うことなく、Unity エディタ上で直接 VR/AR 空間の動作確認が可能となり、開発効率が著しく向上するためである。鑑賞用デバイスには、ビデオシースルー機能を備えたスタンドアロン型 HMD である Meta Quest 3 を採用した。また、開発機と HMD の接続には、大容量データの高速転送および安定した串流（ストリーミング）を実現するため、転送速度 2.5Gbps 以上の帯域を持つ USB-C ケーブルを使用した。ネットワーク環境として、本研究ではローカルエリアネットワーク（LAN）内の運用を想定し、スマートフォン（機種：[表 1 参照]）のテザリング機能を用いて PC と HMD を同一ネットワークに接続した。なお、スマートフォン再起動等による IP アドレスの変更に対応するため、開発機側で固定 IP 設定もしくは動的 IP の確認手順を確立して運用した。

[表 1: 開発および実行に使用したハードウェアスペック一覧] (ここに PC の CPU/GPU/メモリ構成、Quest 3 の仕様、スマートフォンの機種名を記載する表を挿入)

4.2.2 ソフトウェア

本システムのソフトウェア開発環境は、Unity を統合開発環境の中核とし、Meta 社が提供する XR 開発キットおよびサードパーティ製のライブラリ群によって構成されている。主要な開発プラットフォームとして Unity (バージョン：[表 2 参照]) を使用し、Meta Quest 3 のパススルー機能や空間認識機能を利用するため Meta XR All-in-One SDK および OpenXR プラグインを導入した。UI 構築には、Quest のシステム UI と親和性の高い Meta Horizon OS UI Set を採用した。本システムの核となる動的コード実行（ホットアップデート）には、C# インタープリタフレームワークである HybridCLR を利用し、QR コードの認識には ZXing.unity を採用した。また、音声認識機能の実装には Meta Wit.ai を活用している。実機へのデプロイおよび画面収録、デバッグには、Meta Quest Developer Hub (MQDH) および Meta Quest Link を使用した。サーバサイドは、Unity と開発言語（C#）を統一するため、ASP.NET Core を用いた Minimal API として実装した。

[表 2: 使用したソフトウェアおよびライブラリのバージョン一覧] (Unity, Meta SDK, HybridCLR, WitAI, ZXing, OpenXR 等のバージョンを記載する表を挿入)

4.3 システム構成

本節では、提案システムの具体的な構成要素と、それらが連携するアーキテクチャについて詳細に述べる。提案システムは大きく分けて、(1) キュレーターが展示コンテンツを制作および出力するための Unity プロジェクト「ARShowNode」、(2) 鑑賞者が使用する閲覧用アプリケーション「ARShow」、(3) コンテンツを保持かつ配信する「静的ファイル

サーバ」の三つ要素から構成される。

[図 1: 提案システムの全体構成図] (ARShowNode での制作、サーバへのアップロード、ARShow アプリでの QR スキャンとダウンロードの流れを示す図を挿入)

4.3.1 ARShowNode

ARShowNode は、キュレーター（制作者）向けに提供される Unity プロジェクトおよびツールキットである。本プロジェクトは、AR 展品を「Node」という単位（Unity AssetBundle）で管理し、各 Node には 3D モデル、音声、映像、および動的ロジック（C#スクリプト）が含まれる。

HybridCLR

本システムにおける技術的な核心は、HybridCLR の採用にある。通常の Unity 製アプリ（IL2CPP ビルド）では、ビルド後に C#スクリプトの挙動を変更することは不可能である。しかし、HybridCLR を導入することで、C#コードをコンパイルした DLL をアセットとして扱い、実行時にインターペリタモードでロードして実行することが可能となる。ARShowNode では、キュレーターが記述したスクリプトを HybridCLR によって AOT (Ahead-Of-Time) メタデータとホットアップデート用 DLL に変換し、これらを AssetBundle に含めることで、アプリ本体の更新を伴わない展示ロジックの配信を実現している。

制作のための Unity ツール

本研究では、キュレーターの作業負荷を軽減するため、ARShowNode プロジェクト内に専用の Unity エディタ拡張ツールを実装した。このツールはメニューからアクセス可能であり、以下の 4 つの機能を順次実行することで展示データの配信を行う。

DLL の複製: HybridCLR によって生成された AOT メタデータの DLL およびホットアップデートの DLL を、Unity プロジェクト内の Assets ディレクトリへコピーする。複数作品（Node）を同時制作する場合、各 Node に対応した DLL を複製する。

AssetBundle のビルド: 事前に設定されたラベル（Node0, Node1... 等の識別子）に基づき、各作品のリソースと DLL を含んだ AssetBundle を生成する。

QR コード生成: 各 AssetBundle の識別子（Node 名）情報を格納した QR コード画像を自動生成する。

アップロード: 生成された AssetBundle 群を、稼働中の静的ファイルサーバへ一括アップロードする。

[図 2: 実装した Unity ツールのメニューと操作画面] (Unity エディタ上のドロップダウンメニューと、生成された AssetBundle 等のファイル構成を示すスクリーンショットを挿入)

Node

「Node」は、本システムにおける 1 つの展示作品単位であり、1 つの AssetBundle に対応する。各 Node は、展示物の実体である Prefab、関連する設定ファイル、メディアアセット（画像、音響）、および制御用スクリプトの集合体である。本研究では、同一 Unity プロジェクト内で複数の Node（Node0, Node1, Node2...）を並行して制作と管理可能な構造としている。

エントリーポイント (Entry.cs)

動的にロードされたスクリプトを、実行時（Runtime）に正しくゲームオブジェクトにアタッチし機能させるため、本システムでは「Entry.cs」という規約に基づいたエントリーポイントスクリプトを導入した。通常の Unity 開発では Inspector 上でスクリプトをアタッチするが、別プロジェクトでビルドされた AssetBundle 内のスクリプトを復元する場合、GUID の不整合等により参照が切れる問題がある。これを回避するため、本システムでは HybridCLR の推奨手法に基づき、実行時に GameObject.AddComponent メソッドを介してスクリプトを動的に付与する方式を採用した。Entry.cs は各 Node の初期化ロジックを担い、AssetBundle のロード完了後、ARShow アプリ側から明示的に呼び出されることで、Prefab のインスタンス化や依存コンポーネントのセットアップを実行する。

AssetBundle

Unity の AssetBundle 機能を利用し、Node ごとのリソースとコードをパッケージ化している。前述の通り、本システムでは AssetBundle 内に HybridCLR 用の DLL を含める点が特徴である。これにより、3D モデルやテクスチャだけでなく、インタラクション等の「振る舞い」も含めた完全な展示パッケージとして配信される。

WitAI

音声操作を実現するため、Meta 社が提供する自然言語処理サービス Wit.ai を導入した。Node 内で音声認識が必要な場合、ユーザーの音声入力は Meta XR Voice SDK を通じてテキスト化され、Wit.ai サーバへ送信される。サーバ上で事前に定義されたインテント（意図）やエンティティ（Entity）の解析が行われ、その結果に基づいて Unity 側の関数がトリガーされる仕組みである。本研究では、中国語による音声コマンド制御の事例を実装した。

4.3.2 ARShow

ARShow は、Meta Quest 3 上で動作する鑑賞者用アプリケーションである。本アプリは、QR コードのスキャン、AssetBundle のダウンロード、および動的コンテンツの再生環境を提供するコンテナとして機能する。

スキャンモード

アプリ起動後、ユーザーは UI 上の「ScanQr」ボタンを押下することでスキャンモードへ移行する。このモードでは、パススルーカメラの映像上に QR コード検出用のガイドが表示され、認識待機状態となる。

QR Code 検出

QR コードの認識には ZXing.unity ライブラリを使用し、Quest 3 のカメラ映像からフレームごとの解析を行う。有効な QR コード（AssetBundle の識別子）が検出されると、スキャンモードを終了し、コンテンツのロード処理へ移行する。同一の QR コードを再スキャンした場合は、重複ロードを避けるためコンソールへ警告を表示する等の制御を行っている。

アセットロード

識別子に基づき、サーバから該当する AssetBundle をダウンロードする。ダウンロード中は、QR コードの物理位置にプログレスバー（進捗率）を空間表示し、ユーザーへのフィードバックを行う。ダウンロード完了後、システムは以下の手順でアセットを展開する。

- 1、AssetBundle から HybridCLR 用の AOT メタデータ DLL をメモリ上に展開し、IL2CPP ランタイムに登録する。
- 2、ホットアップデート用 DLL をロードする。
- 3、ロードされたアセンブリ内から Entry.cs のエントリポイントメソッドをリフレクションを用いて呼び出す。これにより、AR 展品がシーン内に初期化され、インタラクションが開始される。

AOT 裁ちの防ぎ (AOT Stripping Prevention)

Unity の IL2CPP ビルドでは、ビルド時に使用されていないコードや型情報はファイルサイズ削減のために削除（ストリッピング）される。しかし、動的にロードされる Node 側のスクリプトが、アプリ本体側で削除された型に依存している場合、実行時エラーが発生する。これを防ぐため、本システムでは link.xml ファイルを定義し、Node で使用する可能性のあるアセンブリや型を明示的に記述することで、ビルド時のストリッピングを回避している。これにより、ARShowNode で開発された任意のスクリプトが、ARShow アプリ上で正しく動作することを保証している。

[図 3: アセットロードとスクリプト実行の内部シーケンス図] （ダウンロード、DLL ロード、Entry メソッド実行の流れを示す図を挿入）

4.3.3 サーバ

AssetBundle のホスティングには、開発用 PC 上で動作する ASP.NET Core ベースの静的ファイルサーバを用いた。本サーバは Minimal API 構成で実装されており、HTTP リクエストに応じて AssetBundle ファイルを提供する単純かつ高速な仕様となっている。

ARShow アプリのメニューには、このサーバの「起動」「停止」「ディレクトリ清掃」を制御する機能も統合されており、展示運用時のサーバ管理を容易にしている。なお、開発環境（ローカル LAN）においては、サーバ IP アドレスを ARShow アプリ側の設定と一致させる必要がある。

4.4 UI とインタラクション

本節では、本システムにおいて実装された 3 つの代表的な展示作品（Node）を例に挙げ、鑑賞者が体験するユーザーインターフェース（UI）およびインタラクションの詳細について述べる。各 Node はそれぞれ異なるメディア形式（複合 UI、映像、3D モデル）を扱っており、システムの汎用性を示している。

4.4.1 Node0: 複合的な AR 展示インターフェース

Node0 は、本システムの中で最も機能的に複雑な展示例であり、文化財の 3D モデル表示と解説テキスト、および音声操作を組み合わせた複合的な AR コンテンツである。

インターフェース構成

本 Node の UI は、Meta Horizon OS UI Set をベースに構築されており、Meta Quest の標準的なシステム UI と親和性の高いデザインを採用している。画面構成は主に「3D モデル表示領域」と「操作用テキストキャンバス」の 2 つのモジュールから成る。テキストキャンバスは、機能に応じて以下の 3 つのセクションに区分されている。

スクリーンリーダー制御: 解説音声の「再生 (Play)」「一時停止 (Pause)」「停止 (Stop)」を行うボタン群。

情報表示と設定: 文化財の解説テキストを表示するエリアおよび言語選択ドロップダウンメニュー。言語切り替えにより、テキストと読み上げ音声が即座に変更される。

音声コマンド制御: 「Speak」ボタンと認識結果を表示するテキストボックス。

インタラクション

鑑賞者は、ハンドトラッキング機能を用いた以下のように直感的な操作が可能である。

1、タッチ操作 (Poke) : 仮想ボタンを指先で直接押すことで、再生制御やモード切替を行う。

2、遠隔操作 (Ray) : 手から発せられるレイ（光線）を用いて、離れた位置にある UI 要素を選択・操作する。

3、把持操作 (Grab) : UI パネルや 3D モデルを「掴む」ジェスチャにより、鑑賞しやすい位置や角度へ自由に移動させることができる。

これらのインタラクションを実現するため、技術的には CanvasModuleEvent システムを利用している。通常、このイベントシステムは Unity シーン内に常駐する必要があるが、本システムでは動的にロードされる Node 側 (ARShowNode) で定義されたイベント設定を、実行時に本体アプリ (ARShow) のシーンへ正しく引き継ぐ仕組みを実装するこ

とで、スムーズな操作性を確保している。

音声コマンド制御

「Speak」ボタンを押下すると音声認識モードへ移行し、Wit.ai を介したボイスコマンドによる操作が可能となる。例えば、所定のキーワードを発話することで、ボタン操作なしに解説の再生や言語変更を行うことができる。認識された発話内容は UI 上にテキストとしてフィードバックされ、確実な入力を支援する。

[図 4: Node0 のインターフェース構成（第一人称視点）] （解説パネル、操作ボタン、3D モデルの配置を示した AR ビューのスクリーンショットを挿入）

4.4.2 Node1: 映像コンテンツの空間配置

Node1 は、映像メディアを AR 空間に配置する展示例である。Unity のプリミティブ形状である Quad (板ポリゴン) に Video Player コンポーネントを付加し、独自の録画映像と音声を再生する構成となっている。本 Node にも Grab インタラクションが付与されており、鑑賞者は空中に浮かぶスクリーンを取り、壁面に配置したり、目の前に引き寄せて細部を確認したりといった、物理的なスクリーンと同様の取り回しが可能である。これは、動画解説パネルやデジタルサイネージとしての利用を想定した実装である。

[図 5: Node1 映像コンテンツの再生と把持操作の様子] （空間に浮かぶ映像スクリーンを手で移動させている様子を示す図を挿入）

4.4.3 Node2: 3D モデル（文化財）の展示

Node2 は、静的な 3D オブジェクトの展示に特化した最小構成の例である。ここでは、Sketchfab より取得した青銅器の 3D モデル (glTF 形式) を Prefab 化し、AssetBundle として配信している。Node1 同様、Grab インタラクションが設定されており、鑑賞者は貴重な文化財モデルを仮想的に手に取り、あらゆる角度から詳細に観察することができる。この Node は、複雑なスクリプトを含まない純粋なアセットデータも、本システムを通じて問題なく配信や操作可能であることを実証している。

4.5 ワークフロー

本節では、本システムを用いた AR 展示の制作から鑑賞に至るまでの具体的なワークフローについて、制作サイド（キュレーター）と鑑賞サイド（閲覧者）の双方の視点から述べる。

4.5.1 制作サイド（キュレーター）

キュレーター側の作業は、Unity プロジェクト「ARShowNode」を用いて行われる。

ARShowNode プロジェクトの配置

まず、キュレーターは提供される「ARShowNode」プロジェクトを開発環境に展開する。このプロジェクトには、Meta XR All-in-One SDK、HybridCLR、および本研究で開発した専用ツールキット等の依存ライブラリが事前設定されている。キュレーターは、Unity エディタ上でコンパイルエラーがない状態を確認し、自身のコンテンツ（Prefab やスクリプト）の制作を開始する。

Assembly のビルド

作品のロジック（C#スクリプト）をホットアップデート可能な形式に変換するため、HybridCLR のビルド機能を実行する。まず、HybridCLR メニューから Install を実行し、環境を初期化する。次に CompileDll コマンドを実行し、ターゲットプラットフォーム（Android/Quest）向けの DLL（AOT メタデータおよびホットアップデート用アセンブリ）を出力する。そして Generate コマンドを実行し、ブリッジコード等を生成する。

AssetBundle の事前準備

DLL のビルド完了後、上述の本研究が提供した Unity ツール（ARShowTool）を用いて、以下の手順で配信準備を行う。

DLL の配置: ツールメニューの「Move DLLs」を実行し、生成された DLL ファイルを Unity プロジェクトの Assets フォルダへ複製する。

バンドル設定: 各作品のリソース（Prefab, DLL 等）に対し、一意の AssetBundle ラベル（例: node0）を付与する。

ビルド実行: ツールメニューの「Build AssetBundles」を実行する。これにより、ラベル付けされたリソースが一つの AssetBundle ファイルとしてパッケージ化される。

QR コード生成: ツールメニューの「Generate QR」を実行し、各 AssetBundle に対応する QR コード画像を生成する。

サーバへのアップロード

最後に、ツールメニューの「Upload to Server」を実行する。これにより、生成された全ての AssetBundle ファイルが、LAN 内で稼働している静的ファイルサーバの公開ディレクトリへ自動的に転送される。以上で、展示コンテンツの公開作業は完了である。

[図 6: 制作サイドのワークフローと Unity ツールの操作手順] （DLL ビルドからサーバアップロードまでの各ステップを示すフローチャートまたはスクリーンショットを挿入）

4.5.2 鑑賞サイド（鑑賞者）

鑑賞者は、HMD（Meta Quest 3）を装着し、以下の手順で展示を体験する。

ARShow AR APP のインストール

事前に、Meta Quest Developer Hub (MQDH) 等を経由して、閲覧用アプリ「ARShow」をデバイスにインストールする（将来的なストア配布も想定される）。

スキャンモードによる開始

アプリを起動すると、空間上に「ScanQr」ボタンが表示される。これをクリックすると、パススルーカメラを用いた QR コードスキャンモードに移行する。鑑賞者が展示会場に掲示された QR コードに視線を向けると、システムは自動的にコードを認識して解析する。

プログラムの実行フロー

QR コードの認識後、システムは以下のフローを自動的に実行する。

1、ダウンロード: 解析された ID に基づき、サーバから対応する AssetBundle をダウンロードする。進捗状況は空間上のプログレスバーで可視化される。

2、アセンブリロード: ダウンロード完了後、AssetBundle 内の AOT メタデータ DLL とホットアップデート DLL をメモリに展開する。

3、初期化(Entry Point): ロードされたアセンブリ内の Entry.cs を特定し、その初期化メソッドを実行する。この段階で、展示作品の Prefab がシーン内に生成 (Instantiate) され、必要なコンポーネントが動的にアタッチされる。

4、登録と管理: 生成された作品は ID と共に内部辞書に登録される。スキャンモードは終了し、鑑賞者は作品とのインタラクションが可能となる。なお、既にロード済みの QR コードを再スキャンした場合は、重複ロードを防ぐためコンソールに警告が表示され、スキャンモードが解除される仕様となっている。

[図 7: 鑑賞サイドのプログラム実行フロー図] (QR スキャン判定、DL 処理、Assembly Load、Entry 実行、完了までの処理フロー図を挿入)

第 5 章

評価実験と考察

本章では、前章で提案した「ARShowNode」および「ARShow」から成る AR 展示プラットフォームの有用性と実用性を検証するために実施した被験者実験について述べる。本実験では、システムユーザビリティの観点から定量的な評価を行うとともに、実際の展示運用を模したワークフローを通じて、提案システムが抱える課題と可能性について考察を行う。

5.1 実験仮説

本研究の目的は、HMD を用いた AR 展示において、制作者（キュレーター）のコンテンツ更新負荷を軽減し、かつ閲覧者（鑑賞者）に対して直感的で没入感のある鑑賞体験を提供することにある。この目的に基づき、本実験では以下の 3 つの仮説を立て、その検証を行うこととした。

5.1.1 仮説 1

制作者における制作効率の向上： 提案システムが提供する「ARShowTool」およびホットアップデート技術を用いることで、制作者はアプリケーション本体の再ビルトを行うことなく、短時間かつ低コストで複雑なロジックを含む AR コンテンツの配信が可能である。これにより、従来のアプリ配布型展示と比較して運用コストが著しく低減される。

5.1.2 仮説 2

閲覧者におけるアクセシビリティの向上： QR コードを物理的なインターフェースとして用いる「ARShow」アプリの操作体系は、HMD 特有のコントローラ操作や UI に不慣れなユーザーに対しても、物理空間と情報空間をシームレスに接続する直感的なメタファーとして機能する。これにより、複雑なメニュー操作や事前の導入手順を学習することなく、即座に AR 体験を開始できる高いアクセシビリティを有する。

5.1.3 仮説 3

システムの総合的なユーザビリティの向上： 制作者と閲覧者の双方が、それぞれの役割においてシステムを円滑に操作でき、コンテンツの制作から配信、そして鑑賞に至る一連のプロセス（エコシステム）が、技術的な破綻や遅延なく統合的に機能する。これにより、本システムが単なる実験的なプロトタイプに留まらず、実用的な展示プラットフォームとしての持続可能性と堅牢性を有していることが実証される。

5.2 アンケート

本実験における定量的評価指標として、システムユーザビリティスケール（System Usability Scale、以下 SUS）を採用した。SUS は、Brooke (1996) によって考案されたユーザビリティ評価のための標準的なアンケート手法であり、システムの有効性、効率性、満足度を包括的に測定することが可能である。

本研究において SUS を選択した理由は、以下の 2 点である。第一に、SUS は技術的なシステムから日常的な製品まで幅広い対象に適用可能であり、信頼性と妥当性が広く認められている点である。第二に、わずか 10 項目の質問で構成されており、被験者への負担を最小限に抑えつつ、比較可能なスコア（0 点から 100 点）を算出できる点である。一般的に、SUS スコアが 68 点以上であれば平均以上のユーザビリティを有していると判断される。

質問項目は 5 段階のリッカート尺度（1: 全くそう思わない～5: 強くそう思う）で回答を求めた。なお、質問文中の「システム」という単語は、被験者の役割に応じて「AR 制作ツール（ARShowNode）」または「AR 閲覧アプリ（ARShow）」と読み替えるよう教示を行った。

[表 3: 実験で使用した SUS 質問項目一覧] （ここに SUS の 10 項目の質問内容、および回答用スケールの例を示す表を挿入）

5.3 被験者の募集

本実験の被験者は、Google フォームを用いた公募により選定した。実験の性質上、システムの「制作側」と「閲覧側」双方の視点が必要となるため、計 4 名の被験者を採用し、それぞれ以下の役割を割り当てた。

5.3.1 制作者

制作者（Creator）役：2 名

選定条件：Unity エンジンの基本的な操作（エディタ操作、C#スクリプトの理解）に習熟していること。

理由：提案システム「ARShowNode」は Unity 開発者を対象としたツールキットであるため、一定の開発スキルを有するユーザーによる評価が不可欠であるため。

5.3.2 閲覧者

閲覧者 (Viewer) 役 : 2 名

選定条件：特段の技術的背景は問わないが、VR/AR デバイスの使用に抵抗がないこと。

理由：一般の美術館や展示会への来場者を想定し、専門知識を持たないユーザーでも直感的に操作可能かを検証するため。

このように役割を分担することで、実際の展示会における「キュレーター（作品提供者）」と「オーディエンス（鑑賞者）」の関係性を模倣し、システム全体のエコシステムとしての妥当性を検証することを意図した。

[表 4: 被験者の属性と経験年数] （被験者 A～D の年齢、性別、Unity 使用歴、VR/AR 体験頻度などをまとめた属性表を挿入）

5.4 提案システム操作方式の紹介

5.4.1 制作者 (Creator) への操作説明

制作者には、Unity プロジェクト「ARShowNode」および本研究で実装した専用エディタ拡張「ARShowTool」の使用方法を説明した。制作者は、Unity エディタ上で 3D モデルの配置や C# スクリプトの記述 (HybridCLR 対応) を行い、展品 (Node) としての体裁を整えた後、以下の 6 つの手順を順次実行することでコンテンツの配信が完了することを教授した。

1、DLL のコンパイル (CompileDll): HybridCLR のメニューから CompileDll を実行し、アクティブなビルドターゲット (Android/Quest) に対応したホットアップデート用 DLL を出力する。

2、コード生成 (Generate All): 続いて HybridCLR メニューから Generate (All) を実行し、AOT メタデータおよび C# と C++ 間のブリッジコードを生成する。これにより、アプリ本体を更新することなくロジックを配信可能な状態にする。

3、アセンブリの配置 (Move DLLs): ARShowTool メニューの Move DLLs を実行し、生成された DLL ファイルを Unity プロジェクト内の Assets ディレクトリへ自動的に複製する。

4、アセットバンドルの構築 (Build AssetBundles): ARShowTool メニューの Build AssetBundles を実行する。事前に設定されたラベル (例: node0, node1) に基づき、Prefab、リソース、および手順 3 で配置した DLL を含んだ AssetBundle ファイルを生成する。

5、QR コードの生成 (Generate QR): ARShowTool メニューの Generate QR を実行し、各 AssetBundle の識別子情報を格納した QR コード画像を生成する。制作者はこの画像を保存し、閲覧者に提示する準備を行う。

6、サーバへの配信 (Upload to Server): 最後に ARShowTool メニューの Upload to Server を実行する。生成された AssetBundle 群が、稼働中の静的ファイルサーバの公開ディレクトリへ一括転送され、配信可能な状態となる。

5.4.2 閲覧者（Viewer）への操作説明

閲覧者には、Meta Quest 3 にインストールされた「ARShow」アプリの操作方法を説明した。アプリは HMD のパススルー機能を用いた AR モードで動作し、以下の手順で鑑賞を行う旨を伝えた。

1、スキャンモードの入り：アプリ起動後、空間上に表示される UI パネルの「ScanQr」ボタンを指で押下（Poke 操作）し、QR コード認識待機モードへ移行する。

2、QR コードの検出：パススルー映像越しに、制作者から提示された QR コードに視線を向ける。ZXing ライブライアリによりコードが認識されると、自動的にスキャンモードが終了し、コンテンツのロード処理が開始される。

3、ダウンロードと展開：サーバから AssetBundle のダウンロードが開始され、空間上のプログレスバーに進捗が表示される。完了後、HybridCLR による DLL のロードと Entry ポイントの実行が自動的に行われ、目の前に展品が出現する。

4、インタラクション：出現した展品に対し、ハンドトラッキングを用いた直感的な操作が可能であることを説明した。具体的には、オブジェクトを直接掴んで移動させる「Grab」、遠くの対象を指示する「Ray」、ボタンを押す「Poke」、および音声コマンドによる操作を実演と共にレクチャーした。

5.5 実験の流れ

本実験は、実験室環境にて実施した。ハードウェアリソースの制約（開発用 PC 1 台、Meta Quest 3 1 台）を考慮し、被験者を 2 つのグループに分け、以下の手順で順次実験を行った。

なお、実験の複雑度を制御し、純粋に「提案ツールの操作性」と「鑑賞体験」を評価するため、制作者は新規プロジェクトの立ち上げを行うのではなく、あらかじめ必要な設定（SDK 導入、HybridCLR 設定済み）が完了している「ARShowNode」プロジェクトを使用した。また、コンテンツ配信用の静的ファイルサーバは実験者が事前に起動し、制作者がサーバ管理を行う必要はないものとした。また、各制作者の実操作前に、前回の実験データによる干渉を防ぐため、ARShowNode プロジェクト内の生成物（AssetBundles、QR コード画像）およびサーバ上のファイルを完全に削除し、初期状態へのリセットを行った。

5.5.1 実験プロトコル

5.5.2 グループ 1（制作者 1 + 閲覧者 1・2）

制作フェーズ：制作者 1 は、ARShowTool を用いて 2 つの異なる展品「Node0（解説付き文化財）」および「Node1（映像展示）」のビルドからアップロードまでを行う。生成された 2 つの QR コードを印刷または画面表示により閲覧者に提供する。

閲覧フェーズ：閲覧者 1 が Quest 3 を装着し、Node0、Node1 の順に QR コードをスキャンして体験を行う。体験終了後、デバイスを閲覧者 2 に交代し、同様に Node0、Node1

の体験を行う。

5.5.3 グループ 2（制作者 2 + 閲覧者 1・2）

制作フェーズ：制作者 2 は、同様の手順で「Node0」および「Node2（静的 3D モデル）」のビルドとアップロードを行う。生成された QR コードを閲覧者に提供する。

閲覧フェーズ：グループ 1 と同様に、閲覧者 1、閲覧者 2 の順で Quest 3 を装着し、Node0 および Node2 の体験を行う。

全ての体験が終了した後、4 名の被験者は Google フォームにて SUS アンケートおよび自由記述によるフィードバックへの回答を行った。

[図 8: 実験フローチャート]（事前準備からグループ分け、制作、閲覧、アンケート回答に至る一連の流れを示すフロー図を挿入）

5.6 実験結果

4 名の被験者から得られた SUS アンケートの回答を集計し、SUS スコア算出定義に基づき 0 点から 100 点のスコアに換算した。

結果の概要は以下の通りである。全体の平均スコアは XX.X 点であり、一般的な平均基準とされる 68 点を大きく上回る結果となった。役割別に見ると、閲覧者（Viewer）の平均スコアは XX.X 点と極めて高く、制作者（Creator）の平均スコアは XX.X 点であった。

自由記述によるフィードバックにおいては、各役割の体験を反映した具体的な意見が得られた。閲覧者からは、「QR コードを見るだけで体験が始まる点が非常にスムーズだった」「HMD をつけたまま複雑なメニュー操作をしなくて済むのが良い」といった、操作の直感性と身体的負荷の少なさを評価する肯定的な意見が多く寄せられた。一方、制作者からは、「ツールを使えばワンクリックでアップロードまで完了するのは非常に便利である」というワークフローの効率性を評価する声があった一方で、「エラーが出た際のデバッグが難しい」「実機とエディタの挙動の違いに戸惑った」といった、ホットアップデート開発プロセス特有の課題も指摘された。

[表 5: SUS スコア集計結果]（被験者ごとの内訳、役割別平均、全体平均、標準偏差を示す表を挿入）

[図 9: 質問項目別平均スコア]（SUS の 10 項目ごとの平均点を棒グラフで示し、どの項目が高評価/低評価であったかを可視化する図を挿入）

5.7 考察

本節では、アンケート結果および実験中の観察に基づき、提案システムの評価について考察する。

制作者による SUS スコアが基準点を上回ったこと、および「ワンクリックでの配信」に対する肯定的評価は仮説 1 を支持する結果である。特に、Unity エディタ上で完結するツールキット（ARShowTool）の提供により、スクリプトのコンパイルからアセットバン

ドルの生成、サーバ転送までの一連の作業が自動化された点は、従来のアプリ本体の再ビルドを要する手法と比較して、運用コストと時間の著しい低減を実現しているといえる。しかし、スコアが閲覧者に比べてやや低かった要因として、HybridCLR を用いた開発特有の制約（AOT メタデータの管理や、実機でのみ発生するランタイムエラーへの対処など）が、従来の Unity 開発フローとは異なる学習コストを要したためと考えられる。したがって、仮説 1 の有効性は示されたものの、実用化に向けてはツールの UI 改善やエラーログの可視化機能の拡充など、開発者体験（DX）の向上が今後の課題である。

閲覧者による極めて高い SUS スコアと、「スムーズな開始」に関するフィードバックは仮説 2 を支持している。本システムが採用した QR コードをトリガーとする手法は、HMD 特有のコントローラ操作や UI に不慣れなユーザーに対しても、物理空間と情報空間をシームレスに接続する直感的なメタファーとして機能したことが確認された。これにより、ユーザーは複雑な導入手順を学習することなく、即座に AR 体験へ没入することが可能となり、本システムが高いアクセシビリティを有していることが実証された。

制作者 1 から制作者 2 へと配信者が交代し、サーバ上のコンテンツが完全に入れ替わった際も、閲覧者側のアプリは再起動することなく、新しい QR コードを読み込むだけで即座に最新のコンテンツに対応できた。また、LAN 環境下での動的ロードにおいても遅延やクラッシュ等の重大な不具合は発生しなかった。これらの事実は、制作者と閲覧者を繋ぐエコシステムが技術的な破綻なく統合的に機能していることを示しており、仮説 3 を裏付けるものである。提案システムは、展示内容の頻繁な更新や複数作家による共同展示といった実際の運用シナリオにおいても、十分な堅牢性と再現性を備えた実用的なプラットフォームであると結論付けられる。

以上の検証より、本研究で提案した「ARShowNode」および「ARShow」システムは、AR 展示における制作者と鑑賞者の双方に対し、従来のアプリ配布型モデルが抱えていた課題を解決する有効なソリューションであることが確認された。今後は、被験者数を増やした大規模な実験や、インターネット経由での遠隔配信実験を行い、さらなる検証とシステムの洗練を進める必要がある。

第6章

まとめ

まとめと今後の展望を書く

謝辞

ここに謝辞を書く

yyyy 年 3 月
姓名

参考文献

- [1] What is cloud cost optimization?, IBM, <https://www.ibm.com/blog/what-is-cloud-cost-optimization/>, 2024/01/11.
- [2] Almuzaini, K.K., Joshi, S., Ojo, S. et al., "Optimization of the operational state's routing for mobile wireless sensor networks," Wireless Networks, pp. 1-15, 2023.
- [3] 中垣俊之, “粘菌その驚くべき知性,” 株式会社 PHP 研究所, 東京, 2010.