

# 現実のインターネット

## IoT の先へ、人々の相互理解へ向けて

## Internet of Realities

### Beyond IoT to Bridge Human Understanding

挑戦と機会

*Challenges and Opportunities*

Version 1.0 (日本語)





# 目次

## Contents

まえがき .....	3
序論: Internet of Realities (IoR) .....	6
IoR のユースケース.....	7
IoR 関連用語 .....	10
IoR における研究課題.....	13
どのようにして人間の主観的な現実を計算機的にモデル化し、表現することができるのか? .....	14
どのようにして多様な現実を体験し、人間の認知を拡張するための没入的で直感的なプラットフォームを構築できるのか? .....	17
どのようにして異なる現実をつなぐための、安全で信頼に基づいたネットワークを設計できるのか? .....	19
どのようにして新しい社会的相互作用のかたちを創出し、重要な社会課題の解決や相互理解の促進を実現できるのか? .....	22
どのようにして人間のアイデンティティと尊厳を保護しながら、IoR の倫理的な発展とガバナンスを確保できるのか? .....	25
IoR 参照アーキテクチャ .....	27
引用文献 .....	29
謝辞.....	エラー! ブックマークが定義されていません。

# まえがき

## Preface

私たちはいま、矛盾に満ちた時代に生きています。「世界をかつてないほどつなげる」と約束された情報技術は、今や社会を分断する強力な要因となっています。高度なアルゴリズムによって駆動される情報の流れは、極めて個別化された「エコーチェンバー」を生み出し、理解の断絶を加速させています。客観的には誰もが同じ「事実」の世界に生きているにもかかわらず、近年では、次第に相容れない、しばしば対立する主観的な「現実」の影響が拡大しています。一人ひとりの人生経験や文脈に根ざした現実（すなわち事実の解釈）の分断は、共感や協働の基盤そのものを揺るがしつつあります。

この深刻な課題に応えるため、本ホワイトペーパーは新しいパラダイム「Internet of Realities（IoR、現実のインターネット）」を提案します。IoR は、モノや事実をつなぐ IoT（Internet of Things）の先を目指し、人と人の「現実」同士をつなぐ信頼できる基盤を構築しようとするものです。IoR の目的は、「唯一の絶対的な真実」を押し付けることではありません。そうではなく、自分の内的な状態を他者とすり合わせ、共有現実（Shared Reality）をつくりあげる、その困難でありながら不可欠なプロセスを可能にすることにあります。AI や没入型技術の進展を活かすことで、より深く、より身体的なかたちでの相互理解が可能になると、私たちは考えています。

### プロジェクトの経緯と本書の役割

本書は、2022 年 10 月に開始し 2028 年 3 月まで活動予定の JST CREST Internet of Realities プロジェクトの議論と研究活動を基盤としています。私たちはこれまでに「現実とは何か、現実をつなぐとは何か」という根本的な問いをめぐる議論を重ねると同時に、Interop などの展示会を通じて広く社会との対話や発信を行ってきました。また、知見を深めるため、大規模なシンポジウムを開催しています：

- ・ 2023 年 12 月（第 1 回）：慶應義塾大学の村井純教授から「インターネットの本質」について、カリフォルニア工科大学の下條信輔教授から「共有現実（Shared Reality）」について基調講演をいただきました。
- ・ 2025 年 3 月（第 2 回）：スイス連邦工科大学ローザンヌ校の Olaf Blanke 教授をお招きし、JST CREST マルチセンシング「幻覚スペクトラムの操作と可視化」プロジェクト（研究代表：高橋英彦教授）の皆様と共に主観的な「幻覚」にまで及ぶ複雑なテーマを探究しました。

各回とも招待講演者とプロジェクトメンバーによるパネルディスカッションを行い、議論をさらに深めました。また、京都大学の岡部寿男教授（JST CREST S5 基盤ソフト領域総括）をはじめとする領域アドバイザーの皆様からいただいた数々の助言も、このホワイトペーパーの知見に大きく貢献しています。

本書「Internet of Realities: Beyond IoT to Bridge Human Understanding」は、このビジョンを言葉として定義する最初のステップです。計算機科学、認知科学、社会学、倫理学といった分野を横断した対話の中から生まれた本書は、今後世界の研究者たちが取り組むべき重要課題を示唆していると考えます。これは単なる技術的な問いにとどまらず、人間の認知やアイデンティティ、そしてガバナンスの未来に関わる根源的な課題です。

私たちの目標は、新しいパラダイムの開発を「共生的」「創発的」「適応的」なグローバル社会へと導くことです。そこでは、単なる情報交換ではなく、より深い理解を生み出す能力が社会の基盤となります。産官学の研究者、開発者、政策立案者、そして市民の皆さんに、ぜひこの挑戦に加わっていただき、ともにより良い未来社会を実現する新たなインターネットの形を探求できることを願っております。

**米澤 拓郎**, 名古屋大学

**金岡 晃**, 東邦大学

**青木崇行**, カデインチェ株式会社

**塚田 学**, 東京大学

2025 年 9 月



# 序論: Internet of Realities (IoR)

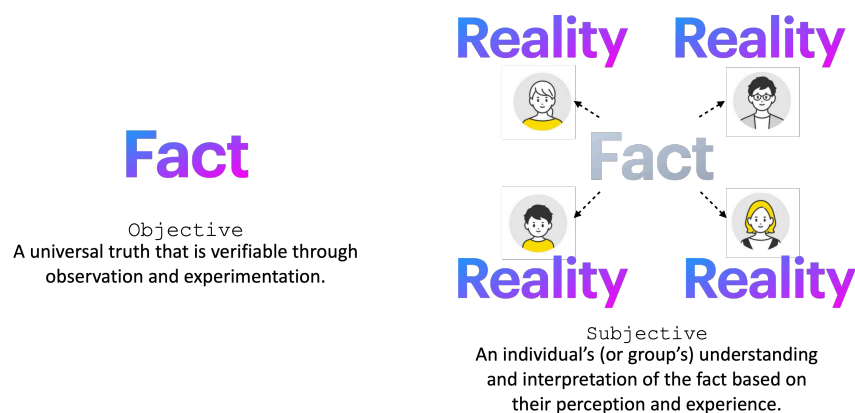
## Introduction to the Internet of Realities (IoR)

### 「現実」の問いと現代社会の分断

「現実とは何か」という問いの持つ意味や、その答えは、その時代の背景、政治、文化、技術などによって常に変化してきました。情報技術によりこれまでにない体験が可能となり、バーチャルリアリティ、デジタルツイン、メタバース、AI といった情報技術が新たな体験や空間、主体を可能にし、社会を構成しうる現代において、人類と地球社会の幸福を追求する上で、この問いの重要性はかつてなく高まっています。

「現実」の定義や解釈は多岐にわたりますが、「事実」との対比で語られることが多いでしょう。すなわち、客観的な観測・実験・証拠に基づき普遍的な真実として受け入れ得るものを「事実」と呼ぶのに対し、その事実を個人の知覚や経験、社会的合意にもとづいて理解・解釈した世界像の主観的総体を「現実」と位置づける立場です。この定義によれば、人の数だけ異なる現実が存在しますが、インターネット以前の社会では、相対的に近接した現実のクラスターが成り立っていたと推測できます。マスメディアは社会の見え方を一定程度均質化し、物質や情報の移動性が限られていた時代には、通学・通勤に代表される生活リズムが人々の経験を共通化していました。

一方、現代の情報メディア技術は嗜好に基づくコンテンツとの出会いを加速し、社会的属性からの解放感や全能感をもたらします。さらに、バーチャル・リアリティや生成 AI はその傾向を押し進める可能性があります。しかし同時に、こうした技術は人々をフィルターバブルへと閉じ込め、都市・コミュニティ・地域への帰属感を弱め、異なる他者との相互理解を損なうリスクも孕んでいます。



このような背景の中、現代社会は高い緊張関係にさらされつつあります。私たちは同じ物理的世界に生き、同じ事実に触れているはずなのに、その「世界の受け止め方」は加速度的に分岐しています。本来はお互いがわかりあうための、共有の意識を育むはずだった技術は、逆に個別化された現実を構築する道具になっています。この分断は「事実」そのものから生じるのではなく、事実をどう解釈するか、すなわち個々の記憶や文化、内的状態に基づいて意味づける「認知のプロセス」から生じます。その結果、主観的な現実が孤立し、誤解のリスクがつながりの可能性を上回る世界が広がりつつあります。

## 新しい情報通信パラダイム：Internet of Realities (IoR)

この状況に対して私たちが提案するのが「**現実のインターネット / Internet of Realities (IoR)**」です。IoR は単なるデータの交換を目的とするのではなく、異なる現実を橋渡しするための新しい情報通信パラダイムです。その本質は「**現実際通信 (Inter-Reality Communication)**」、すなわち自分の内的な状態を意図的に共有し、他者の現実を理解することにあります。個々人の現実は異なっているとしても、共感や協働の可能性は「**共有現実 (Shared Reality)**」の創出にあると考えられます。

モノのインターネット (IoT) が物理デバイスをデジタル領域に統合し、客観的事実のセンシング・共有・分析を通じて生産性向上や効率化、安心・安全に寄与してきたのに対し、IoR のビジョンはそれを超え、個人・集団・社会の文脈で解釈・意味づけられた多様な「現実」の認識と相互接続を通じて、人々の相互理解や社会的調和の支援を目指します。

このビジョンを進めるために、IoR では次の 3 つの基本原則を掲げます。

- ・ **共生 (Coexistent)**：まったく異なる現実が合意を強制されることなく共存できるエコシステムであること。対立や摩擦を管理しながら、安心して率直に内的状態を共有できる空間を提供すること。

- ・ **創発 (Emergent)**：異なる現実の知見を組み合わせることで、単独の視点では解決できない課題に対して新しい解決策を導き出すこと。人と人だけでなく、「現実どうし」の協働を可能にすること。

- ・ **適応 (Adaptive)**：人間の現実が変化し続けるように、IoR も進化し続ける柔軟で強靱な枠組みであること。必然的に生じる倫理的課題や社会的リスクに対応し、人間の幸福に資する方向に導くこと。

これら 3 つの原則こそが、IoR 研究を前進させる基盤であり、私たちを「知識」ではなく「理解」を中心とした未来へと導く羅針盤となると考えています。

# IoR のユースケース

## Use Cases of the IoR

「Internet of Realities (IoR)」は単なる技術的なパラダイムシフトにとどまらず、人間の主観性を扱い、相互理解を促し、社会課題に取り組むための新しいアプローチを提案するものです。本章では、その実践的価値を示すために、ユースケースを **2つの軸** に沿って整理します。

1. **自己志向の応用**：個人の成長や意思決定を支援するもの
2. **他者志向の応用**：コミュニケーションや協働を支援するもの

さらに、これらが社会的孤立や孤独といった高齢化社会で緊急性を増す課題の予防へと拡張可能であることを述べます。

## 自己の現実の活用

### Utilizing One's Own Reality

・ **自己認識の深化**：IoR システムは個人の内的状態を記録・可視化し、自己理解のための道具となります。思考や感情、行動のパターンを振り返ることで、自らの認知傾向や人生経験の影響を理解し、自己同一性の感覚を育みます。

・ **情報摂取の質の改善**：IoR のパーソナライズは単なる情報の取捨選択にとどまらず、個人の主観的現実には照らして文脈化を行います。たとえばニュースや学術情報を読む際に、偏りを指摘したり、別の framing を提示したりします。これにより、エコーチェンバーに陥るリスクを減らし、バランスの取れた知識獲得を促します。



・ **自己肯定感と心の健康支援**：個人の強みや価値観、意味のある経験を可視化することで、自らの存在価値を再確認できるようにします。外部からの承認に依存せず、内的な動機づけを再発見することは、心理的ストレスや孤独への耐性を高めます。

・ **意思決定の支援**：キャリアの転換や健康行動など複雑な選択を行う際に、IoR は客観的なデータ（統計的な予測など）と主観的な状態（感情的な快適さ、過去の嗜好など）の両方を提示します。これにより、合理的でありながら、自らの現実に基づいた意思決定が可能になります。

・ **創造性とインスピレーションの促進**：過去に創造的な発想が生まれた条件（環境要因、感情状態、人との関わりなど）を分析することで、個人に特化したインスピレーションの源泉を特定できます。さらに対話型のブレインストーミングツールと組み合わせることで、芸術・学術・ビジネス領域における創造性を高めます。

## 他者の現実の活用

### Utilizing Others' Realities

・ **相互理解の支援**：IoR は感情や認知的枠組みといった内的状態を精緻に共有できるため、異文化間の対話においても、単なる言語のやり取りを超えて「同じ発言が文化ごとにどう響くか」を体感できます。これにより、共感や繊細な解釈が可能になります。

・ **共感マップと共通体験の構築**：参加者同士の現実を比較し、重なりや相違点を可視化する共感マップを生成できます。また、VR/AR を用いて互いの生活圏を歩いたり、重要な記憶を再現したりする体験を共有することで、文化や専門分野、思想の違いを超えて関係性を深められます。

・ **コミュニケーションと協働の支援**：交渉やプレゼンテーション、日常会話などにおいて、IoR は相手の認知的・感情的状態に合わせてメッセージの表現を最適化できます。グループにおいては、集団的な視点を編み合わせ、相乗効果を強調し、バランスの取れた解決策を提示することができます。その結果、対話の質が向上し、合意形成や創造的な協働が円滑に進みます。

・ **エンターテインメントと文化交流の拡張**：IoR は文化や芸術の体験を受動的な消費にとどめず、観客が複数の視点から公演を体験したり、物語世界を相互作用的に探索したりすることを可能にします。これにより、文化や芸能の新たな魅力が引き出され、異文化交流も促進されます。

## 社会課題への応用：孤立・孤独の予防

### Addressing Societal Challenges: Preventing Social Isolation and Loneliness

IoR の応用で特に有望なのは、公衆衛生や地域福祉の分野です。社会的孤立や孤独は心身の健康リスクと密接に関連しており、その予防には個人レベルの働きかけと社会システムの両方が必要です。

・ **個別化された社会参加の道筋**：IoR はウェアラブルや体組成計のデータを地域の活動情報と統合できます。これにより「自己認識」と「地域活動参加」とを接続し、スポーツや文化活動、ボランティアなどへの自然な参加を後押しします。

・ **地域における共有現実の形成**：住民同士の共通関心や趣味、願いを可視化することで「つながりの予兆的な場」をつくり出します。これにより参加の障壁が下がり、地域のつながりが強まり、孤立の根本的要因にアプローチできます。

・ **ハイブリッド型の支援モデル**：デジタルツールによる提示は大規模な支援を可能にしますが、解釈やケアには人間的関与が不可欠です。IoR を基盤とした地域システムは、社会福祉士や教育者、保健師などと連携し、大規模なアウトリーチと個別的な支援の両立を実現します。

これらのユースケースは、IoR が単なる技術インフラではなく 社会技術的な枠組みであることを示しています。

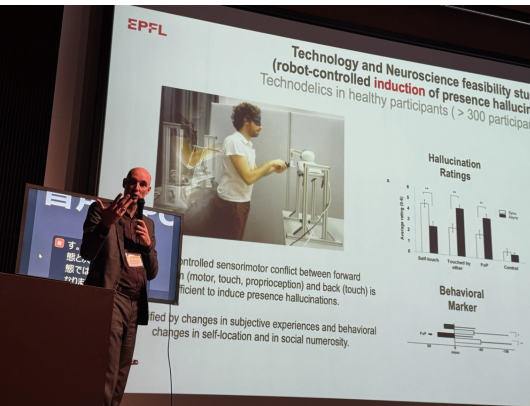
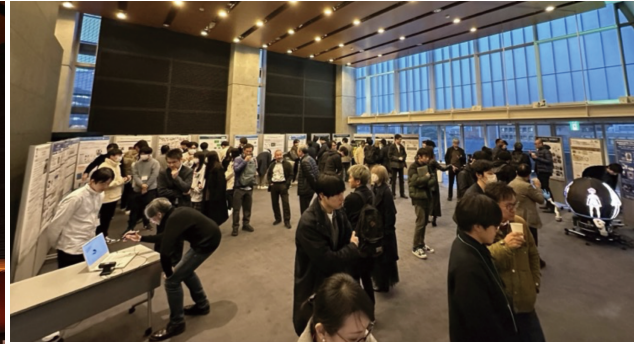
— 個人にとっては、内省・創造・意思決定を支援する。

— 集団にとっては、相互理解・協働・文化交流を促進する。

— 社会にとっては、孤立や孤独といった喫緊の課題に解決の糸口を提供する。

IoR は、単なる情報交換ではなく「共有現実の創出」を通じて、共生的・創発的・適応的な社会を実現する可能性を有すると我々は考えています。





# IoR 関連用語



## IoR Related Terminology

**事実/Fact:** 観察や実験を通じて検証可能な普遍的な真実

**現実/Reality:** 個人（または集団として）の知覚・**来歴/Personal History** による事実（世界）の理解と解釈

**共有現実/Shared Reality**<sup>1</sup>: 2 者間または集団内において、ある特定の対象に対する内部状態を他人と共有するプロセスや、その認識

**実体/Entity:** 独立して存在する、物体、存在、またはシステム。**事実/Fact** の対象であり、個人の**現実/Reality** における知覚の対象であり、**共有現実/Shared Reality** が形成される際の焦点となりうる。

**物理空間/Physical Space:** **実体/Entity** が存在し相互作用する三次元の環境。観測可能な**事実/Fact** の主要な源であり、個人の**現実/Reality** を形成する感覚的知覚の基礎的な文脈となる。

**実質空間/Virtual Space:** コンピュータによって生成された、多くはネットワーク化された環境。**物理空間/Physical Space** とは異なり、その特性は物理法則ではなくコードによって定義されるが、そのルールは文脈内における**事実/Fact** と見なせる。個人の**現実/Reality** に寄与する独自の知覚を提供し、**共有現実/Shared Reality** を確立するための媒体として機能する。

**内部状態/Internal State:** 判断、信念、感情、態度などを含む、個々の**実体/Entity** の主観的な状態の集合。これらの状態は、個人の**現実/Reality** の基本的な構成要素であり、**共有現実/Shared Reality** を創造するプロセスで交換されるものである。

**解釈/Interpretation:** 個人が知覚した情報に意味を割り当てる認知プロセス。観察による生データ（潜在的な**事実/Fact**）を、個人の**現実/Reality** を構成する構造化された主観的な理解へと変換する重要なメカニズムである。

---

<sup>1</sup> Echterhoff, G., Higgins, E. T., & Levine, J. M., "Shared reality: Experiencing commonality with others' inner states about the world." *Perspectives on Psychological Science*, Vol. 4, No. 5, pp. 496–521 (2009)

来歴/Personal History: 個々の**実体/Entity**の過去の事実的体験と**解釈/Interpretation**の累積的な記録。新しい情報が処理される方法を形成する独自のフィルターとして機能し、それによって現在の**現実/Reality**の基盤を形成する。

共通性/Common: 複数の個人の**現実/Reality**にまたがって存在する要素（例：信念、来歴）を記述する属性。**共通性/Common**をもつ要素の存在は、**共有現実/Shared Reality**を確立するための基盤、あるいはその結果となりうる。

共有/Share: 自らの**内部状態/Internal State**を、他の**実体/Entity**が知覚できるように外部化する行為。これは、個々の**現実/Reality**の間に橋を架け、**共有現実/Shared Reality**を構築するために必要な基本的な行動である。

現実際通信/Inter-Reality Communication: 自己の**現実/Reality**を伝え、他者の**現実/Reality**を理解するという特定の目的を持った、2つ以上の**実体/Entity**間の情報交換。**解釈/Interpretation**の違いを解消し、**共有現実/Shared Reality**を確立することを目的とした**共有/Sharing**のメカニズムである。

セキュリティ/Security: **実体/Entity**と情報の完全性を保護する手段および状態。この文脈では、検証可能な**事実/Fact**の性質を改ざんから守り、**共有現実/Shared Reality**を創造するためのチャンネルが悪意ある妨害から守られることを保証することを指す。

プライバシー/Privacy: **実体/Entity**が自身の来歴/Personal History、**内部状態/Internal States**、および**現実/Reality**全体へのアクセスを制御する権利。自己の**現実/Reality**のどの側面を個人的なものとし、どの側面を**Share**のために利用可能にするかを選択的に決定する能力である。

信頼/Trust: 他の**実体/Entity**の信頼性、誠実さ、真摯さに対する信念。**信頼/Trust**は、他者の**事実/Fact**に関する主張を受け入れ、真の**共有現実/Shared Reality**を構築するために自らの**内部状態/Internal States**を**共有/Sharing**するという、脆弱性を伴うプロセスに関与するために不可欠である。



# IoR における研究課題

## IoR Research Questions

Internet of Realities (IoR) の発展には、学際的かつ深い協働が不可欠です。以下に示す5つの主要研究課題は、さまざまな分野にわたる議論を踏まえており、相互理解のためのインターネットを構築するうえで私たちが直面する多様な挑戦と機会を明らかにしています。



どのようにして人間の主観的な現実を計算機的にモデル化し、表現することができるのか？



どのようにして多様な現実を体験し、人間の認知を拡張するための没入的で直感的なプラットフォームを構築できるのか？



どのようにして異なる現実/Realityをつなぐための、安全で信頼に基づいたネットワークを設計できるのか？



どのようにして新しい社会的相互作用のかたちを創出し、重要な社会課題の解決や相互理解の促進を実現できるのか？



どのようにして人間のアイデンティティと尊厳を保護しながら、IoRの倫理的な発展とガバナンスを確保できるのか？



# どのようにして人間の主観的な現実を計算機的にモデル化し、表現することができるのか？

## How can we computationally model and represent subjective human realities?

Internet of Realities (IoR) にとっての挑戦的な課題の1つは、客観的な事実の処理を超え、個人の主観的な現実そのものを理解することにあります。これは、人が観測可能な出来事をどのように固有の内的世界観へと変換しているのかを形式化する試みです。私たちはこの課題を「**現実埋め込み (Reality Embedding)**」と呼びます。

この問題に取り組むために、相補的な二つの研究方向性を想定しています。一つは、**現実が内的に形成される仕組み**をモデル化する方向。もう一つは、**内的状態を外化するシグナル**を観測する方向です。

### 1. 解釈のアーキテクチャのモデル化

#### *Modeling the Architecture of Interpretation*

第一の方向性は、私たちが世界をどのように解釈するのかという「内的アーキテクチャ」をモデル化することを目指します。すなわち、客観的な事実が、各人の来歴・記憶・文化などの固有のフィルタを通して、どのように主観的な現実へと変換されるのか、そのプロセスを明らかにすることです。同じ出来事であっても、人によって喜びや不安など異なる内部状態が生じる理由を、計算機モデルとして説明可能にすることを目標としています。

#### 主要な研究課題

- **解釈のアーキテクチャ**：到来する事実の現実としての理解が、個々の来歴によって動的に形づくられるプロセスを、忠実に表現できる計算枠組みは何か。
- **来歴の形式化**：膨大かつ非構造な経験を、倫理とプライバシーを確保しつつ、計算モデルが扱える形式へとどのように変換できるか。

### 2. 現実の顕れの観測

#### *Observing the Manifestations of Reality*

第二の方向性は、私たちの現実としての解釈はしばしば身体や行動に可観測な形で顕れるという原理に基づきます。主観的な状態は純粋に内的にとどまらず、多くの場合、身体反応やふる

まいとして表出します。たとえば、環境への馴染みは認知負荷に影響し、それは脳活動（EEG）や心拍変動（HRV）の変化として計測され得ます。こうした客観的・実世界のシグナルを捉えることで、個人の主観的体験への実証的な窓が開かれると考えています。

### 主要な研究課題

- **内部状態のデコーディング**：ノイズを多く含むマルチモーダル時系列データ（生理・行動シグナル）から、文脈依存的に認知負荷・情動・集中などの内部状態を頑健に推定するための信号処理・機械学習モデルは何か。
- **現実のインデキシング**：生理・行動反応のパターンと、特定の主観的体験（例：「不慣れな環境における方向感覚の喪失」「社会的孤立に由来する不安」）との対応関係をどのように確立し、主観的現実の客観的な代理指標を構築できるか。

### 統合アプローチ

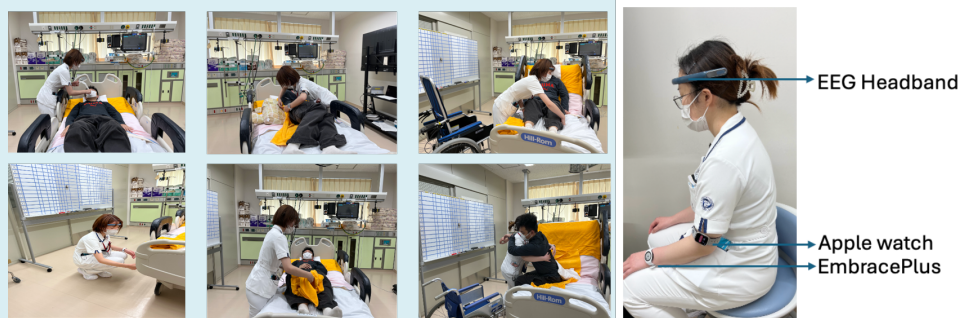
#### *An Integrated Path Forward*

これら二つのアプローチは分離的ではなく、織り合わせられるべきものです。解釈モデルは個人の内部状態について予測を生成し、それを実世界の生理・行動データで検証・更新できます。逆に、観測されたデータは、個人化されたより精緻な現実モデルの構築に寄与します。この統合アプローチにより、研究コミュニティ全体にとって以下の統一的な問いへと収束すると考えられます。

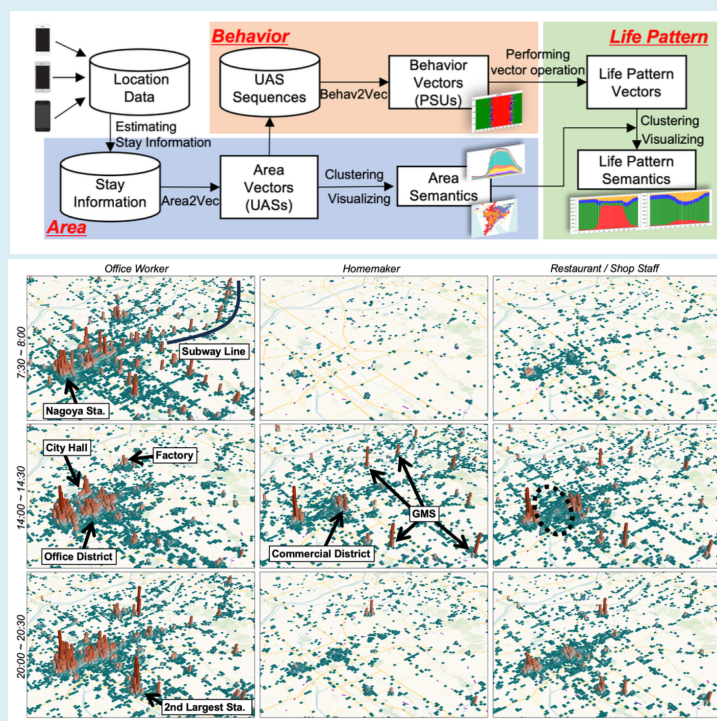
“「主観的体験の計算モデル」と「実世界における観測可能な顕れ」を接続し、モデルが信頼可能で、かつ本人の実際の内部現実と真正に整合していることをどのように保証するか？”

## Research Highlight

現実の頭れの観測に関する事例として、SICU（外科系集中治療室）の看護師を対象に、ウェアラブルで生理シグナル（HRV など）を活動文脈とともに取得・解析しました [1]。その結果、「患者の体勢移動」のような特定タスクが、身体に明確で計測可能なストレス特性を生じさせることを観測し、機械学習モデルにより高ストレス状態を 80%精度で同定できることを示しました。主観的な職業ストレスのような体験が、客観的・生理学的状態としてデコード可能であることを示唆しています。



もう一つの研究事例として、ラベルなしの GPS データのみから、人の社会的役割やライフスタイルという現実の重要側面をスケーラブルにモデル化する枠組み[2]を紹介します。まず多数ユーザの滞在パターンから都市空間の機能的意味（例：オフィス／住宅）を学習し、その意味づけられた場所間の移動列として個人の生活を表現。ライフパターンのクラスタリングにより、「オフィスワーカー」「店舗スタッフ」等の群を同定しました。長期の行動の頭れを観測することで、大規模・非ラベルデータから意味ある人間属性を埋め込み・推定できることを示しています。



# どのようにして、多様な現実を体験し人間の認知を拡張する、没入的で直観的なプラットフォームを構築できるのか？

## How can we build immersive and intuitive platforms for experiencing diverse realities and augmenting human cognition?

「現実」が計算機的に埋め込まれた（Reality Embedded）後、それを自己または別の主体が知覚可能な体験へとレンダリングする必要があります。私たちはこの翻訳過程を **Reality Hosting**（リアリティ・ホスティング）と呼びます。これは、個人の多層的な世界観データを、直観的な没入体験へと変換する大きな挑戦です。目標は、単に他者の世界を「表示」することではなく、観察を超えて「共有」という行為へとつなぐため、身体化された理解に至らせるプラットフォームを築くことにあります。そのため、これらのプラットフォームは受動的なディスプレイではなく、思考を補助し拡張する認知ツールとして設計されるべきです。

このビジョンの実現には、ヒューマン・コンピュータ・インタラクション（HCI）、没入型技術、認知科学にまたがる先駆的な研究が求められます。プラットフォームは共感と深い理解を育みつつ、同時にユーザー自身の認知能力のシームレスな延長として機能するよう、慎重に設計されねばなりません。さらに、多様な機器からスケーラブルにアクセス可能とする Web 技術との親和性も重要となります。

### 主要な研究課題

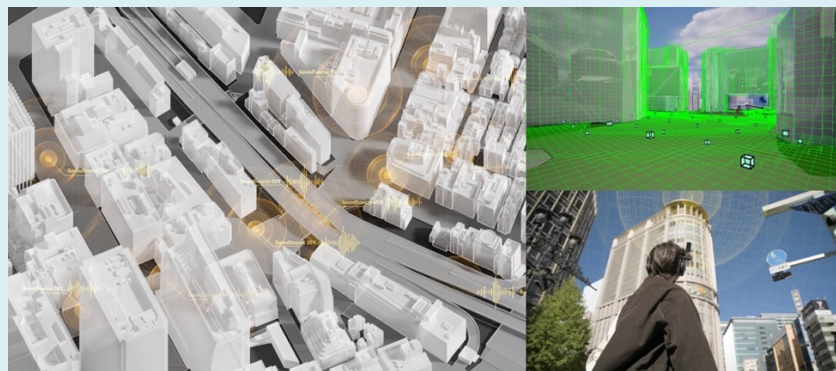
- **共感のためのインタフェース（The Interface for Empathy）**：ユーザーが他者の「現実」を過負荷や方向感覚の喪失なく航行できるための設計原則は何か。VR/AR を単なる情報表示ではなく臨場感と身体化を育むために活用し、真の視点取得を可能にするにはどうすれば良いのか。
- **感覚翻訳の課題（The Sensory Translation Problem）**：信頼、文化的価値、確信といった内的状態の抽象的な成分を、どのように感覚情報へ翻訳できるか。情動ハプティクス、空間音響、嗅覚など、非言語的・潜在的次元を伝送するための基盤技術の確立が求められる。
- **認知の共進化（The Co-evolution of Cognition）**：思考と視点取得の強力な道具となるにつれ、記憶、創造性、批判的思考など、人間の認知プロセスを依存やスキル低下を招かずに拡張する設計とは何か。人と技術の相乗的な関係をどのように実装すべきか。



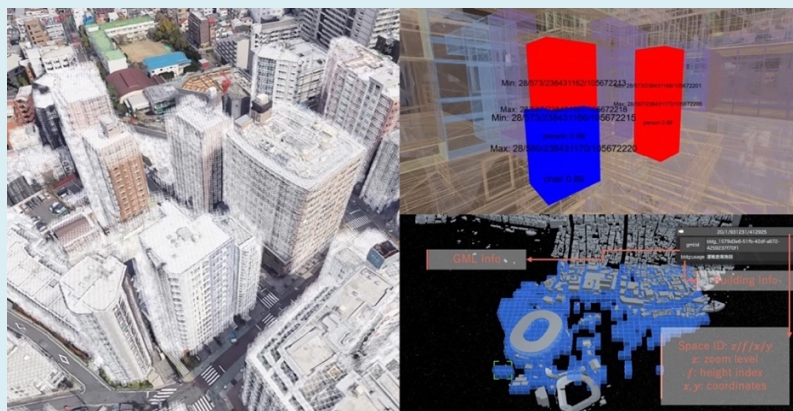
- **スケーラブルな共在の課題（The Challenge of Scalable Coexistence）**：数百万の固有で動的な現実を共有仮想空間で同時にホストし、相互に探索可能にするにはどうすれば良いでしょうか。整合性、性能、そして地球規模のスケーラビリティを満たす分散計算アーキテクチャが求められます。

## Research Highlight

デジタルツイン基盤 PLATONE[3,4]は、地理参照された都市文脈内でのリアルタイム 3D 音響の空間化を実証しました。国交省の PLATEAU 3D 建物モデルを駆動する雲上の波動伝播シミュレーションにより、遮蔽・回折・残響を再現。軽量の歩行者追跡ユニットは RTK-GNSS・慣性・気圧高度を統合してドリフトを抑え、都市スケールでもサブデシメートル級の絶対測位を実現します。これにより、複雑な屋外・アーバンキャニオン環境でも仮想コンテンツや音が物理世界に安定的にアンカーされます。プロトタイプ導入は没入音響体験のみならず、歩行者ナビゲーションやコンテキスト対応 MR の実行可能性も示しました。定位と感覚拡張の収束を基盤に、文化応用・建設支援・リアルタイム都市探索を音を媒介に可能にするプラットフォームの礎を築いています。



Spatial ID [5]は、3D 空間を階層的 4D ボクセル ID でアドレス化・クエリ化可能なデータベースへと転換し、異種データセットやライブデータストリームの多解像度相互運用を実現します。本仕様の上に、エッジクラウドのパイプラインを構築し、静的な PLATEAU 都市モデルとリアルタイム IoT 検知を Spatial ID へ符号化。静的データはベクトルタイル、動的データは pub/sub で扱うことで、低遅延のデータベース照会・発見・購読を可能にするユースケースを実証しています。



# どのようにして、異なる「現実」同士を接続するための、安全で信頼に基づくネットワークを設計できるのか？

## How can we design a secure and trust-based network for connecting different realities?

個々の現実を機能的なネットワークへと結びつけること、私たちはこれを **Reality Networking**（リアリティ・ネットワーキング）と呼びます。これは IoR のインフラ基盤であり、現実際通信（Inter-Reality Communication）と定義される新しいコミュニケーション（自分の現実を相手に伝え、相手の現実を理解することを目的とした情報交換）を可能にします。この実現のためには、セキュリティ、プライバシー、トラスト（信頼）が、システムが前提として満たすべき性質として確立されていなければなりません。

この信頼の土台なくしては、IoR が目指す「真正な共有を通じた相互理解」は実現できないと考えられます。したがって、このネットワークの構築には、分散システム、暗号技術、データガバナンスに関する基盤的課題を解決しつつ、他者の理解を促進するためのネットワーキングやプラットフォーム技術が不可欠となります。

### 主要な研究課題

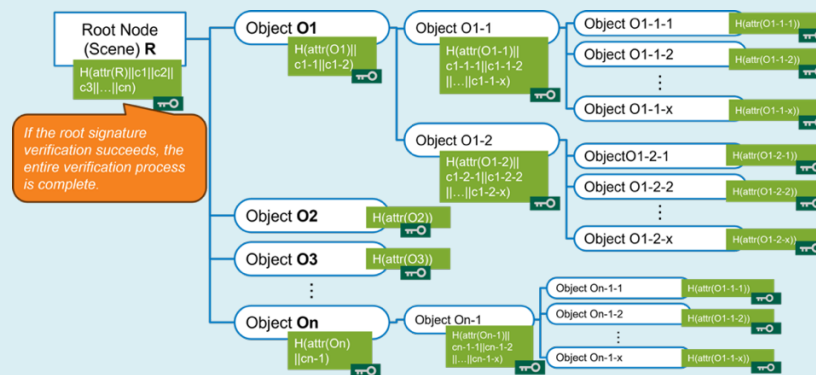
- **分散型トラストのプロトコル**（Protocols for Decentralized Trust）：中央集権的な仕組みに依らず、現実間コミュニケーションに関与する二つのエンティティ間でトラストを確立するには、どのようなプロトコルが必要か。検証可能なクレデンシャルやデジタル署名を用いて、共有された内部状態の正当性をピアツーピアで検証できる仕組みが求められる。
- **コンテキスト完全性の保存**（Preservation of Contextual Integrity）：ある現実のコンポーネントを共有する際に、その文脈やニュアンス（固有の解釈や来歴の産物）が失われたり歪められたりしないよう、ネットワークはどのように設計されるべきか。これは、異なる主観的世界観の間で意味を伝達するという、深いセマンティック（意味論的）課題への取り組みを含み。その一方で、個人のプライバシーを保護しつつ、相互理解に必要な情報（内部状態に関連する活動や物体）のみを文脈に応じて選択的に共有するための観点も重要となる。

- **多様な端末におけるコンテキスト理解** (Context Understanding on Lightweight Devices) : 非力な計算端末を含む MR/VR 端末が、高度な視覚推論や環境認識（物体検出、ポーズ推定など）をオンボード能力を超えて実行するために、エッジおよびクラウドリソースと低遅延で協調し、現実のコンテキストをいかに豊かに保てるかが重要となる。
- **物理・仮想空間間のシームレスな接続** (Reality Border Management) : 物理空間と仮想空間に存在する実体間で、空間的・感覚的な断絶なく、あたかも同じ場にいるかのようなテレプレゼンスを実現するための、プラットフォームや接続方式を探索する必要がある。

## Research Highlight

TrustWeave : 3D 資産の部分整合性検証によるトラスト層[6]:

シーングラフを Merkle 木へ写像し、親ノードの単一署名で部分木の完全性を確認可能にすることで、3D 資産の真正性を担保。Unity 統合および大規模 VR/AR シーンでの評価では、イベント駆動の部分検証においてほぼ一定の低遅延を維持し、没入感を損なわず迅速なチェックを実現しました。Unreal/ARKit/Android XR/WebXR など複数プラットフォームでの微粒度な真正性と高効率を両立し、マルチユーザ・マルチサービス環境における IoR の Reality Networking の実用的なトラスト層として機能します。

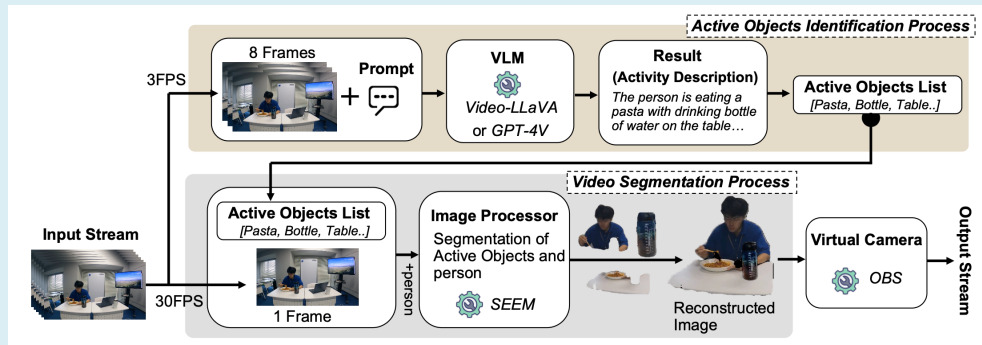


エッジ協調による MR コンテキスト理解：軽量端末と高機能推論の両立 [7]:

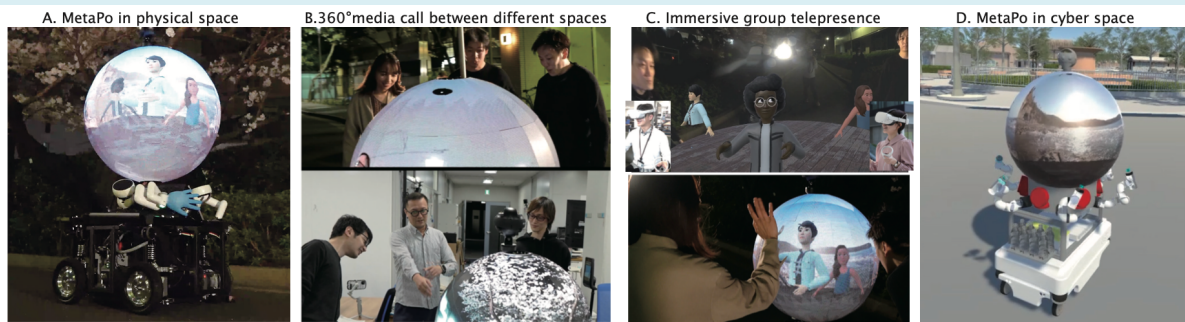
小型エッジ AI アクセラレータへ視覚推論（物体検出・分類、人物ポーズ推定、セマンティックセグメンテーション、顔認識）をオフロードし、境界ボックス・マスク・ラベル等の構造化出力を低遅延でヘッドセットへ返すコプロセッシング枠組みを実装。環境の内部モデルを豊かに保つことで、仮想オブジェクトの家具への安定添付、アバターの対人反応、群集流動に適應するナビなどを実現し、軽量端末でもオンボード能力を超えるモデルを活用可能にします。



ActStream：文脈に応じた選択的共有によるプライバシー配慮型ビデオコミュニケーション[8]:  
映像内の活動に関連する対象（Active Objects）のみを選択的に共有することで、プライバシーと文脈理解を両立。VLM（Vision-Language Model）でユーザの注視や行動を解析して意味的に関連する物体を抽出し、リアルタイムセグメンテーションでユーザ＋関連物体のみを送出、それ以外を不可視化します。カジュアルな常時接続から MR 協働まで、社会的に心地よくかつプライバシーに配慮した接続を支援する実装であり、IoR の理念（主観的現実の尊重と相互理解）に整合します。



MetaPo [9] は、物理空間とサイバー空間にまたがるコミュニケーションを統合するために設計されたロボティック・ポータルシステムです。球体ディスプレイ、360° カメラおよびマイク、ロボットハンドを備えた MetaPo は、分散した環境同士をつなぐゲートウェイとして機能し、全周（パノラマ）コミュニケーションと没入的なインタースペース移行の双方を可能にする。本システムは二つの中核的コミュニケーション様式を定義します。Mixed Link では、ユーザはそれぞれの環境に留まったまま、MetaPo の機動性とマルチユーザ対応により強化された全周映像・音声ストリームを介して接続する。Immersive Link では、遠隔参加者が VR を通じて MetaPo の仮想ポータルに入り、遠隔環境を 360° 没入で体験することで、従来の 1 対 1 型テレプレゼンスを越えたグループ・テレプレゼンスを実現する。プロトタイプは、360° カメラ、球体 LED ディスプレイ、VR ポータル、ロボットアクチュエータを統合し、物理とサイバーの文脈間をシームレスに遷移できることを示しました。インタースペース・コミュニケーションの統一モデルを提示することで、MetaPo は異種の現実にもたがる共有的プレゼンス（co-presence）を育み、主観的世界を橋渡しするという IoR のビジョン実現に寄与しています。





# どのようにして、重大な社会課題の解決と相互理解の醸成を実現する、新しい社会的インタラクションの形を創出できるのか？

## How can we create new forms of social interaction to realize the resolution of critical societal challenges and the fostering of mutual understanding?

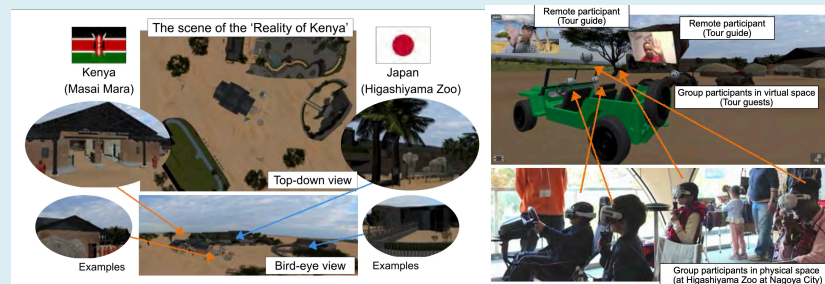
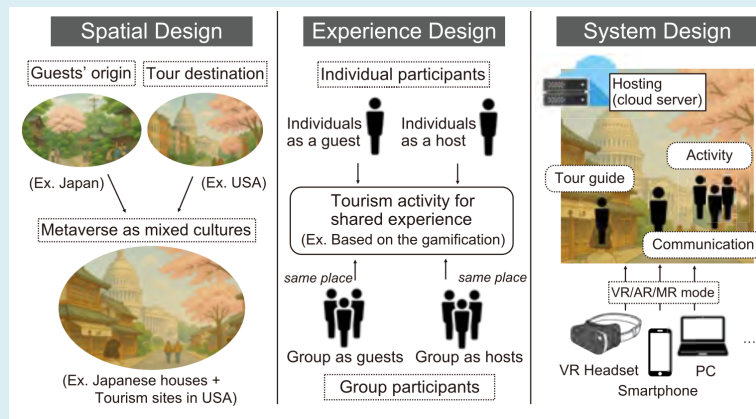
IoR の目的は、より深い相互理解によって駆動される **Reality Transformation**（現実の変容）、ポジティブな社会変革を触発することにあります。私たちは、この変容は単に情報を共有するだけでは達成されず、IoR を活用した新しい社会的インタラクションのパラダイムを設計・育成することによって実現されると考えます。こうした新しい相互作用モデルは、人々が自らの内的世界の共通性を見だし、共有現実（Shared Reality）を発見／構築する助けとなります。そのための課題は、汎用的なプラットフォームを越え、現実の問題に向けて意図的にこのつながりの状態を育むことを目的としたターゲットアプリケーションを設計することにあります。このためには、社会心理学・コンフリクト解決・インタラクションデザインを横断的に統合し、相互理解のブレークスルーを安定して生み出す体験を構築する必要があります。

### 主要な研究課題

- ・ **新しい社会的インタラクション・パラダイムの設計**（Designing New Paradigms for Social Interaction）：特定の集団が共通基盤を発見し、新たな共有現実を構築できるよう導く、IoR 媒介型の体験をどう設計するか。単純なコミュニケーションを越え、共感の形成・解釈差の調整・信頼の構築を目的とする、構造化され目標指向の相互作用プロトコルを設計することが求められる。
- ・ **理解の計測**（The Measurement of Genuine Understanding）：共有現実の萌芽をどのように科学的に計測するか。行動分析や自己報告に、心拍や脳活動の対人的同期といった客観的生理指標を組み合わせ、IoR アプリケーションの効果を正しく評価するための堅牢なフレームワークが必要である。
- ・ **複雑な社会課題への適用**（The Application to Intractable Problems）：政治的分極、国際的対立の解決、文化教育などの難解な社会課題に、これらの原則を最も効果的に適用する方法は何か。特定の集団間での現実間コミュニケーションを促進し、従来は到達不可能だった新しい共有現実の発見／構築を支援する、高度に文脈化された介入を設計する必要がある。

## Research Highlight

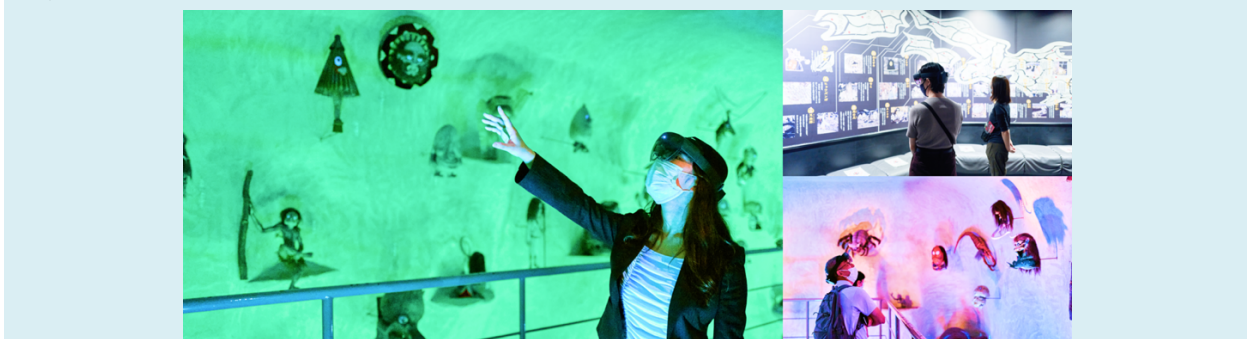
MetaUniTour[10]は、IoR が有する Reality Transformation（現実変革）の可能性を示すプラットフォームです。このプラットフォームは、従来型 VR 観光にしばしば見られる表層的な文化交流の課題に対し、IoR の原則を適用しています。協働タスク（ゲームドライブなど）や役割付与（現地参加者／遠隔ガイド）を通じて、異なる「現実」を持つ当事者間にリアルタイムの相互理解と信頼が生まれるよう意図的に設計されています。具体的には、ゲスト文化とホスト文化の要素（例：名古屋の動物園とケニアのマサイ・マラ）を融合した「Mixed Cultures Space」を構築し、知覚の非対称性を是正します。実験の結果、参加者には強い一体感が生まれ、異文化への好奇心が高まりました。これは、相互理解の醸成という社会価値に向け、IoR が具体的な道筋を提供し得ることを示唆しています。



MR 歌舞伎[11]は、Mixed Reality（複合現実、MR）ヘッドセットを活用し、伝統芸能である歌舞伎を現代の観客にとって理解しやすく拡張する試みです。古典的な言語や物語が初学者には難解であるという課題に対し、字幕、解説、視覚・音響効果を、舞台の視界を妨げずに重畳表示しました。約 100 名のユーザースタディの結果、理解と没入感の深化が示され、特に初心者観客に対して有効であることが確認されました。



MR ミュージアム・ガイド[2]は、MR ヘッドセットとビジュアル・ポジショニング（Visual Positioning）技術により、既存の展示物に 3D オブジェクト、解説、音声ガイドなどのデジタルなレイヤーを直接重畳し、物理的制約を超える体験を設計します。水木しげる記念館での 93 名の評価では、高い満足度が得られ、80%を超える参加者が体験価値の向上と追加料金の支払い意思を示しました。



医療 XR の応用[13] では、単純な「注意そらし」を超えた複雑な疼痛管理に XR（クロスリアリティ）を適用しました。具体的には、VR（仮想現実）による幻肢痛の軽減（感覚運動ループの回復とそれに連動する脳の機能再編）や、AR（拡張現実）による在宅運動支援（高齢者の筋骨格系疼痛の軽減と心理的ウェルビーイングの改善）を実証し、個人の主観的現実を治療的に再構成し得る可能性を示唆しています。



# どのようにして、人間のアイデンティティと尊厳を守りながら、IoR の倫理的な開発とガバナンスを確保できるのか？

## How can we ensure the ethical development and governance of the IoR while protecting human identity and dignity?

現実に計算機的にアクセスし、それを共有可能にする力は、計り知れない倫理的責任を伴います。もしガバナンスが不適切な IoR であれば、それは極めて強力な操作や社会的コントロールの手段となりえます。したがって、倫理とガバナンスに関する学際的かつ先駆的な取り組みは、最優先の要件となります。システムは人間の基本的な価値と整合し、その中心に個人のアイデンティティと尊厳の保護を据えなければなりないと考えています。

IoR の倫理・ガバナンス枠組みは、社会的な危害が生じる前にリスクを予見し、軽減できるような設計されなければなりません。そのためには、技術者、倫理学者、法学者、政策担当者などの協働が非常に重要です。

### 主要な研究課題

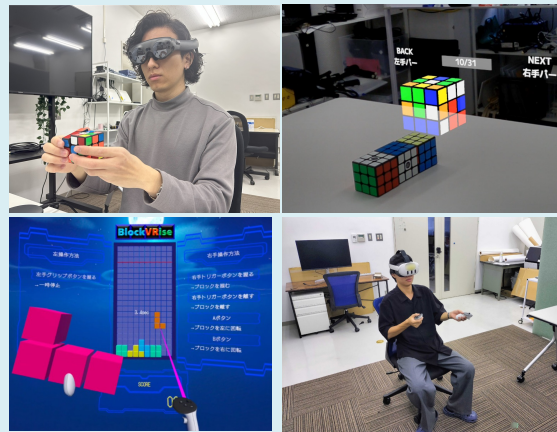
- **アイデンティティと尊厳の不可侵性** (The Sanctity of Identity and Dignity) : IoR は、私たちを私たちたらしめている核心に触れます。心理的な操作、来歴の強制的改変、あるいは中核的なアイデンティティや尊厳への深刻な挑戦から人を守るために、どのような新しい倫理枠組みと技術的な安全策が必要か。
- **意味ある同意（コンセント）の本質** (The Nature of Meaningful Consent) : 主観的な現実の構造そのものの共有が求められるとき、「同意」とは何を意味するか。単なるクリックによる同意を超え、動的、粒度可変、撤回可能で、それぞれが自身の内的世界のプライバシーを連続的かつ明確に統御できる新たな同意モデルを設計する必要がある。
- **グローバル・ガバナンスの枠組み** (Frameworks for Global Governance) : IoR は、国境や中央集権的な制御を超えたグローバルで分散型のネットワークが想定される。分散型自律組織、マルチステークホルダー監督機関、新しいデジタル法学など、アカウントビリティ（説明責任）、公正性、普遍的人権の保護をエコシステム全体で確実にするための新しい統治モデルは何か。



## Research Highlight

IoR は、技術的なセキュリティにとどまらず、主観的な被害をいかに定義し、軽減するかという難題を抱えています。私たちは、XR（クロスリアリティ）の脅威分析において、知覚操作、心理的ストレス、誘発的な方向感覚の喪失など、従来のセキュリティモデル「STRIDE」を超えるリスク領域を指摘しました[14]。こうした新たな危害領域を明確にすることは、認知的ウェルビーイングの保護、そして責任ある共有現実の開発を目指す IoR の倫理的アジェンダに資するものです。

IoR を責任ある形で実現するためには、没入型技術が人間の認知や行動に与える影響の理解が不可欠です。私たちの研究では、シースルーHMD（ヘッドマウントディスプレイ）における画像運動攻撃や、XR における聴覚刺激攻撃を対象に、視線誘導、注意の歪み、空間知覚の変容が、利用者の自覚なしに起こりうることを示しました[15,16]。これらは、脅威の可視化であると同時に、安全なシステム設計を導く体系でもあります。知覚が密かに影響されうる条件を明らかにすることで、リスクを先取りし、防護策を組み込む XR 環境の設計が可能になります。こうした脆弱性の提示と人間中心の防御設計の両輪は、進化する認知的・社会的現実における信頼と安定の確立に貢献します。

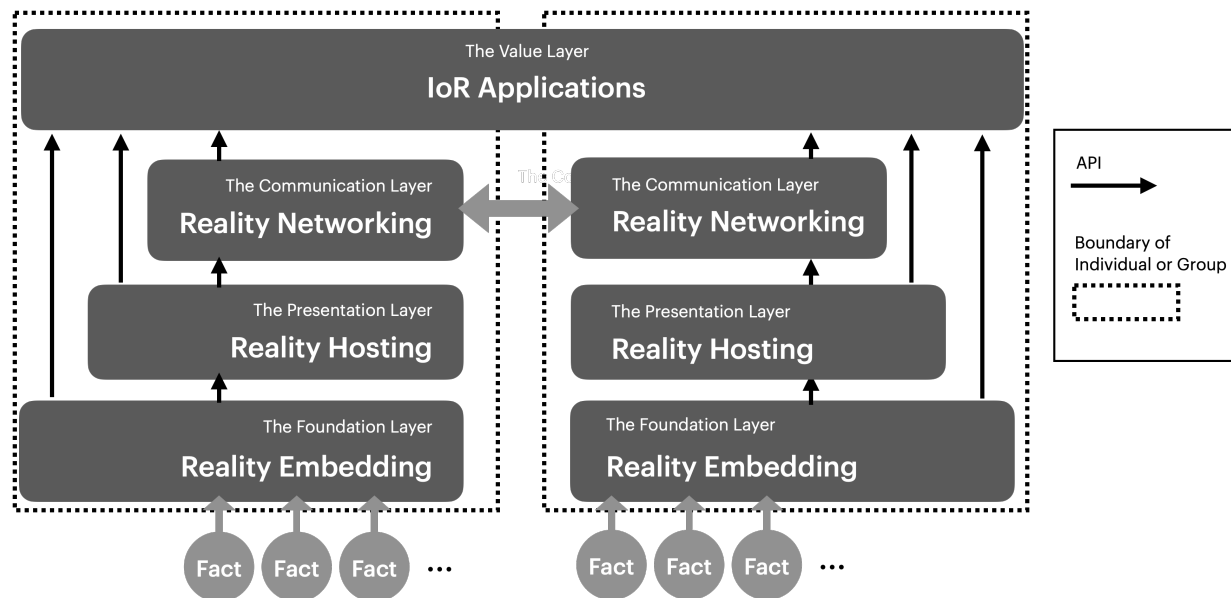


JST RISTEX（科学技術振興機構 社会技術研究開発センター）の「サービス・モビリティと多形態コミュニティの繋がりによる社会的孤立・孤独予防モデル（AmPlatea プロジェクト）」では、社会的孤立・孤独を予防する社会を実現するため、移動を単なる人の移送にとどめず、人々をつなぐ手段として再定義しています。図書館バス、移動販売車、検診車などのサービス・モビリティが目的地そのものとなり、コミュニティの結節点を創出します。本プロジェクトで構築した Community Compass は、体組成などの日常的なヘルスデータと地域活動情報を統合し、大規模言語モデル（LLM）により文脈適合的な地域参加を推薦することで、つながりの予期的空間を育むことを目指しています。本プロジェクトでは社会学、福祉学、コミュニケーション学、倫理学の専門家や行政担当者などと連携し、適切なシステム構築と社会実装に取り組んでいます。

# アプローチ：IoR 参照アーキテクチャ

## Our Approach: The IoR Reference Architecture

私たちは、前章までに示した多面的な研究課題に体系的に取り組むため、IoR リファレンス・アーキテクチャを提案します。これは、固定的な技術仕様書ではなく、主観世界をつなぐ共生的・創発的・適応的なエコシステムの開発を導くための概念フレームワークです。本アーキテクチャは、相互に深く結び付いた4つのレイヤーで構成されます。各レイヤーは、それぞれ中核となる研究課題に対応し、個人の内部で現実が形成される段階から、集合的な理解を生み出す応用段階まで、現実（Reality）のライフサイクルにおける重要な機能を担います。



### Reality Embedding (基盤レイヤ The Foundational Layer)

この基盤レイヤは、最も根源的な課題である主観的経験の計算機モデル化に直接取り組みます。すなわち、センシングで取得した客観的事実の生データを、ある実体固有の現実へと構造化し、計算可能な表現へ埋め込む複合プロセスを担います。

単なるデジタルイズではなく統合的な合成であり、このモデルは、その実体の来歴や解釈といった認知過程を考慮し、信念や感情などの内部状態を形式化します。その出力は、主観的現実の高次元かつリッチなモデルであり、検証可能性と真正性という中核課題に向き合いながら、IoR エコシステム全体の基礎データを提供します。

## Reality Hosting (提示レイヤ The Presentation Layer)

このレイヤは、Embedding レイヤで生成された構造化データを、実体が知覚・巡航（ナビゲート）できる感覚的体験へと翻訳する、IoR の体験的な導管です。

VR/AR などの没入技術を活用し、抽象的な計算モデルと他者の生きられた知覚経験のあいだのギャップを橋渡しします。鍵となるのは単なる性能ではなく本質的な理解の促進にあり、非言語的で繊細な内部状態のニュアンスを伝えるための新しいインターフェース設計や感覚翻訳の方法が求められます。

## Reality Networking (通信レイヤ The Communication Layer)

このレイヤは IoR を「インターネット」たらしめる接続のファブリックであり、安全かつ信頼に基づくネットワーク設計という第三の研究課題に対応します。現実際通信のためのプロトコルを提供し、脆弱性を伴う自己の現実の共有を保護します。

単なるデータ転送ではなく信頼のアーキテクチャとして、分散型 ID や先端暗号技術により、実体の内部状態と来歴のプライバシーを強制的に担保します。さらに、意味が伝送の過程で失われたり歪められたりしないよう、文脈的完全性の保持を設計原則として組み込みます。

## IoR Applications (価値レイヤ The Value Layer)

最上位の価値レイヤは IoR の最終的な目的、すなわち相互理解の醸成と社会課題の解決に直接応えます。下位レイヤの能力を活かし共有現実を意図的に育むアプリケーションを支えます。

ここでは、複数の個別現実に含まれる要素を合成・比較し、複数の実体が共通基盤（common ground）を発見・構築できるよう支援します。これは協働的意思決定や共感形成の具体的メカニズムを提供する場であり、同時に倫理・社会的含意（第五の研究課題）が最も濃密に現れる層でもあります。なぜなら、これらのアプリケーションの設計が、人間のアイデンティティや社会的相互作用の未来に直接影響を与えうるからです。

---

これら 4 層を通底させることで、単一の実体の内的世界から出発し、強靱で集合的な共有現実を創出するまでの研究開発ロードマップが系統立てて整理されと考えています。

## 引用文献 / Bibliography

- [1] Tahera Hossain, Mohammad Saiedur Rahaman, Keiko Yamashita, Kono Aoi, Ma Guowei, Oyama Shintaro, Takuro Yonezawa, "Quantifying Work-Stress in Surgical Intensive Care Unit Nurses: A Multimodal Activity-aware Physiological Analysis", ISWC '25: Proceedings of the 2025 ACM International Symposium on Wearable Computers. Pages 118 - 124, to appear
- [2] Kazuyuki Shoji, Haru Terashima, Naoki Tamura, Shin Katayama, Kenta Urano, Takuro Yonezawa and Nobuo Kawaguchi, "Unveiling Human Attributes through Life Pattern Clustering using GPS Data Only", SIGSPATIAL '24: Proceedings of the 32nd ACM International Conference on Advances in Geographic Information Systems, Pages 621 - 624
- [3] Orsholits, Alex; Qian, Yiyuan; Nardini, Eric; Obuchi, Yusuke; Tsukada, Manabu: PLATONE: An Immersive Geospatial Audio Spatialization Platform. In: The 2nd Annual IEEE International Conference on Metaverse Computing, Networking, and Applications (MetaCom 2024), Hong Kong, China, 2024.
- [4] Takada, Tokio; Nakazato, Jin; Orsholits, Alex; Tsukada, Manabu; Ochiai, Hideya; Esaki, Hiroshi: Design of Digital Twin Architecture for 3D Audio Visualization in AR. In: The 2nd Annual IEEE International Conference on Metaverse Computing, Networking, and Applications (MetaCom 2024), Hong Kong, China, 2024
- [5] Bao, Naren; Orsholits, Alex; Tsukada, Manabu: 4D Path Planning via Spatiotemporal Voxels in Urban Airspaces. In: 3rd Annual IEEE International Conference on Metaverse Computing, Networking, and Applications (IEEE MetaCom 2025), Seoul, Republic of Korea, 2025.
- [6] Taiyo Arai, Kosei Otsuka, Akira Kanaoka, "Digital Signature Scheme for 3D Objects and Efficient Partial Verification Method Utilizing Scene Graph Hierarchy", Computer Security Symposium 2025 (In Japanese)
- [7] Orsholits, Alex; Tsukada, Manabu: Context-Rich Interactions in Mixed Reality through Edge AI Co-Processing. In: The 39-th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA 2025), Barcelona, Spain, 2025, ISBN: 978-3-031-87771-1.
- [8] Kaiya Shimura, Kazuma Kano, Tahera Hossain, Shin Katayama, Kenta Urano, Shun Taguchi, Hideki Deguchi, Hiroyuki Sakai, Takuro Yonezawa, Nobuo Kawaguchi, "Real-time Activity-Aware Video Streaming While Preserving Privacy", UbiComp / ISWC 2025 Posters & Demos, 2025, to appear
- [9] Takuro Yonezawa, Nozomi Hayashida, Kenta Urano, Johannes Przybilla, Yutaro Kyono and. Nobuo Kawaguchi, "MetaPo: A Robotic Meta Portal for Interspace Communication", ACM SIGGRAPH2022, Poster, Article No.: 28, Pages 1 - 2

- [10] Kohei Matsumoto, Yoshiki Watanabe, Kaiya Shimura, Nozomi Hayashida, Shin Katayama, Kenta Urano, Nobuo Kawaguchi, Soko Aoki, Leleito Emanuel and Takuro Yonezawa, "MetaUniTour: Enhancing Engagement and Intercultural Understanding through A Metaverse Tourism Platform", IEEE MetaCom 2025
- [11] Soko Aoki, Akinori Inada, Masashi Tomita, "MR Kabuki: Mixed Reality Enabled Performing Arts" 2024 International Conference on Intelligent Computing and its Emerging Application
- [12] Soko Aoki, Naoki Itabashi, Ripandy Adha, Shinichi Sameshima, Yuki Kinoshita, Takeo Kotoku, "Mixed Reality Guided Museum Tour: Digital Enhancement of Museum Experience" IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops 2023.
- [13] Yuko Otake, Michihiro Osumi, Soko Aoki, Takamichi Kogure, Masahiko Sumitani, "Usefulness of the Extended Reality (XR) Technology on Pain Management" The Japanese Journal of Rehabilitation Medicine, Vol.61 No.9 pp.812-818
- [14] Akira Kanaoka, Ryota Mori, Kosei Otsuka, Shota Kurasaki, Tetsushi Oki, Toshihiro Ohigashi, Takamasa Isohara, "A Systematic Analysis of Security Threats and Attack Surface in VR/AR Environments.", SCIS2025: The 42nd Symposium on Cryptography and Information Security (In Japanese)
- [15] Shodai Kurasaki, Akira Kanaoka, "Image Movement Attacks on Optical See-Through HMDs: Covert Gaze Manipulation and Privacy Risks in AR/MR System", the 3rd Annual IEEE International Conference on Metaverse Computing, Networking, and Applications (IEEE MetaCom 2025), 2025
- [16] Kousei Otsuka, Akira Kanaoka, "Auditory Stimulus Attack in XR: Stimulus Characteristics and Technical Background Considerations", the 3rd Annual IEEE International Conference on Metaverse Computing, Networking, and Applications (IEEE MetaCom 2025), 2025
- [17] JST RISTEX AmPlatea Project, <https://internet-of-realities.org/amplatea/>
- [18] Microsoft Research Asia, Societal AI White Paper, <https://www.microsoft.com/en-us/research/project/societal-ai/white-paper/>

## 謝辞/Acknowledgments

本研究は、国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）の戦略的創造研究推進事業（CREST）（課題番号: JPMJCR22M4）の支援を受けて実施されました。研究活動を通じて出会った国内外の数多くの方々との示唆に富んだ意見交換や貴重なご助言が、本書のビジョン構築の礎となりました。また、Microsoft Research Asia の Societal AI Whitepaper [18] は本書の作成・構成等にあたり、大変参考にさせていただきました。ここに心より感謝の意を表します。なお、本書の英語版および日本語版の制作・校正には、一部生成 AI を活用しています。