

ICT研究開発支援セミナー



将来社会に向けたデジタルツイン/ Beyond5Gのビジョン

大阪大学 下西英之
2026年3月3日

自己紹介



アジェンダ



- 過去を振り返る
- 未来を想像する
- そして現在
 - Beyond 5Gとデジタルツインについて考える
 - 大学キャンパスをデジタルツイン化して共創の場とする
 - いくつかの研究開発の例
- まとめ



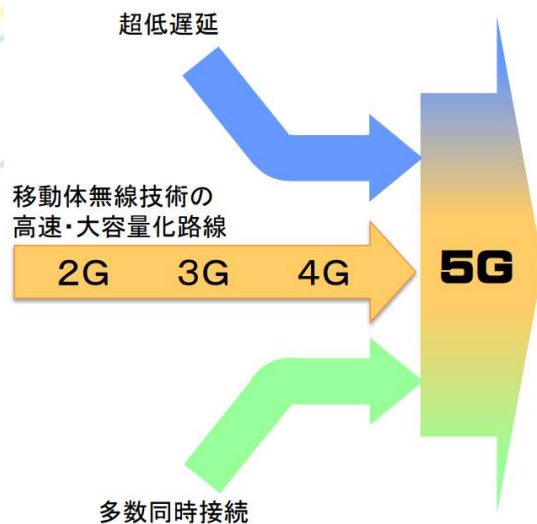
過去を振り返る



5G (第五世代移動通信システム)

- 5Gとは何か

5Gは、IoT時代のICT基盤



超高速

現在の移動通信システムより100倍速いブロードバンドサービスを提供



⇒ 2時間の映画を3秒でダウンロード

超低遅延

利用者が遅延(タイムラグ)を意識することなく、リアルタイムに遠隔地のロボット等を操作・制御



ロボットを遠隔制御

ヘリ内で緊急手術

⇒ ロボット等の精緻な操作をリアルタイム通信で実現

多数同時接続

スマホ、PCをはじめ、身の回りのあらゆる機器がネットに接続



膨大な数のセンサー端末

カメラ

スマートフォ

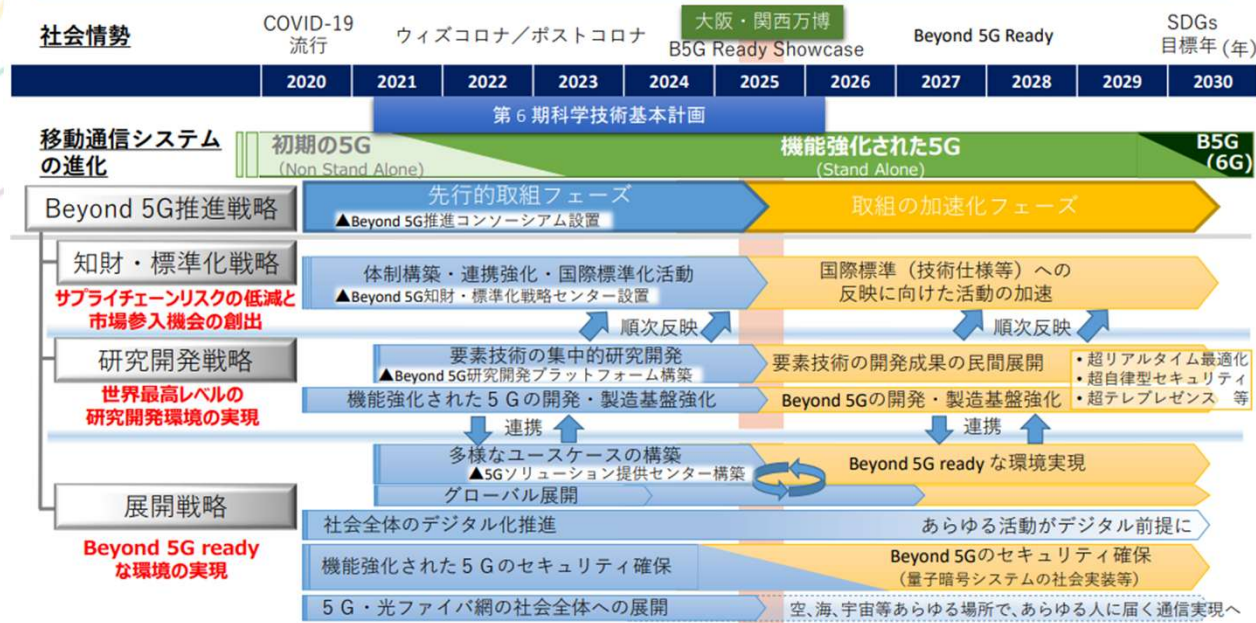
⇒ 自宅屋内の約100個の端末・センサーがネットに接続
(現行技術では、スマホ、PCなど数個)

社会的なインパクト大

Beyond 5G 推進戦略ロードマップ



- 危機を契機と捉え、強靱かつセキュアなICTインフラの整備を含む社会全体のデジタル化を一気呵成に推進。
- 最初の5年が勝負との危機感を持ち、特に「先行的取組フェーズ」で我が国の強みを最大限活かした集中的取組を実施。
- 大阪・関西万博の機会（2025年）に取組の成果を「Beyond 5G readyショーケース」として世界に示し、グローバル展開を加速。



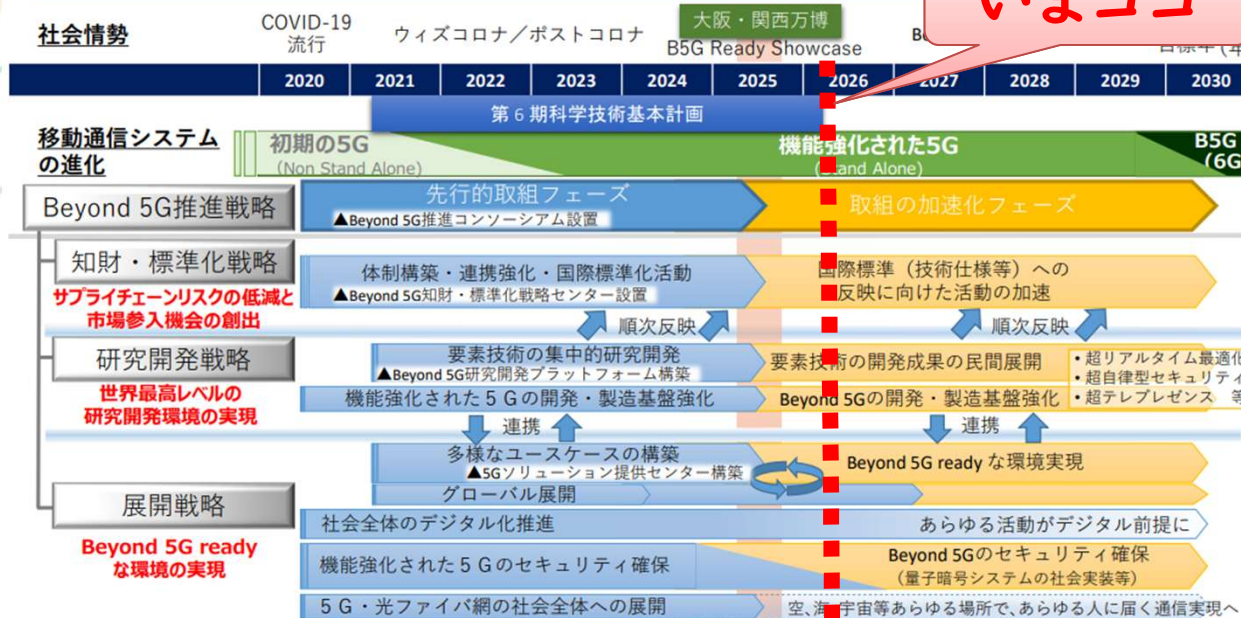
(出典) 「Beyond 5G推進戦略 -6Gへのロードマップ-」の公表、総務省 報道資料、令和2年6月30日
https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban09_02000364.html

Beyond 5G 推進戦略ロードマップ



- 危機を契機と捉え、強靱かつセキュアなICTインフラの整備を含む社会全体のデジタル化を一気呵成に推進。
- 最初の5年が勝負との危機感を持ち、特に「先行的取組フェーズ」で我が国の強みを最大限活かした集中的取組を実施。
- 大阪・関西万博の機会（2025年）に取組の成果を「Beyond 5G readyショーケース」として世界に示し、グローバル展開を加速。

いまココ



(出典) 「Beyond 5G推進戦略 -6Gへのロードマップ-」の公表、総務省 報道資料、令和2年6月30日
https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban09_02000364.html

キラーユースケースはいつ実現されるのか

世代	ユースケース(当初期待)	ユースケース(現実)	ギャップ・理由
3G	動画・音楽配信 モバイルインターネット モバイルTV・ビデオ通話	モバイルブラウジング・メール・SNS初期形態 テキスト中心サービス 限定的なビデオ通話	通信速度が期待より遅い(数百kbps~数Mbps) データ通信料金が高価 スマートフォン普及前
4G / LTE	高画質動画ストリーミング モバイルゲーム・クラウドアプリ M2M・IoT社会の実現	スマートフォン普及と動画配信 SNS・モバイルアプリの拡大 一部IoT(スマート家電など)	IoTは限定的 M2Mは産業用途に限定 超低遅延までは到達せず
5G	自動運転・遠隔医療・スマートシティ・XR(AR/VR) 工場の完全自動化・ロボット連携 超低遅延でのリアルタイム制御	高速通信による動画・ゲーム・通信容量増大への対応 限定的なXR・産業IoT・スマートファクトリー	超低遅延/ネットワークスライシング/エッジコンピューティングの実装は限定的 ユースケースが収益化しにくい
6G	ホログラム通信・触覚通信 空・海・宇宙を含む全領域接続 AIネイティブ・デジタルツイン社会	実現に向けて研究開発を進める	技術的ハードル 実需/ユースケースの不透明さ 投資回収モデル未確立

さらに未来の社会に向けて考える

※Chatgptを用いて検索



未来を想像する



デジタルツインとは

- 実世界と仮想世界との双子のオブジェクト
 - オブジェクト：ICTシステム、人、ロボット、ビル、街、世界、なんとかverse
- 物理からデジタルと、デジタルから物理への反映が、**両面で自動化**

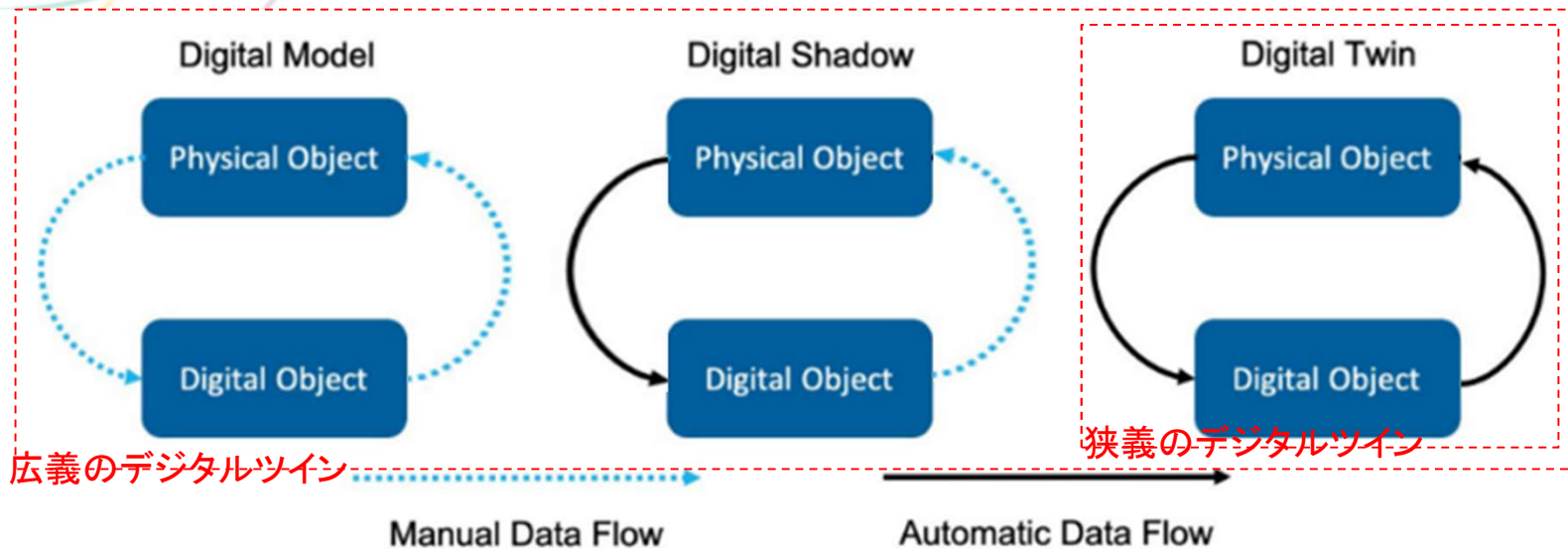


Figure 1. Digital Model, Shadow and Twin.

A. Fuller, et. al., "Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research," in IEEE Access, vol. 8, pp. 108952-108971, 2020.

デジタルツインによる新しい眼の誕生

- 空間全体をくまなく、高精細・高精度に、リアルタイムに表現
 - ICTシステムにおける“眼の誕生” c.f. カンブリア爆発の「光スイッチ説」
 - サイバーフィジカル技術の爆発的進化を期待

デジタルツイン

触覚

視覚

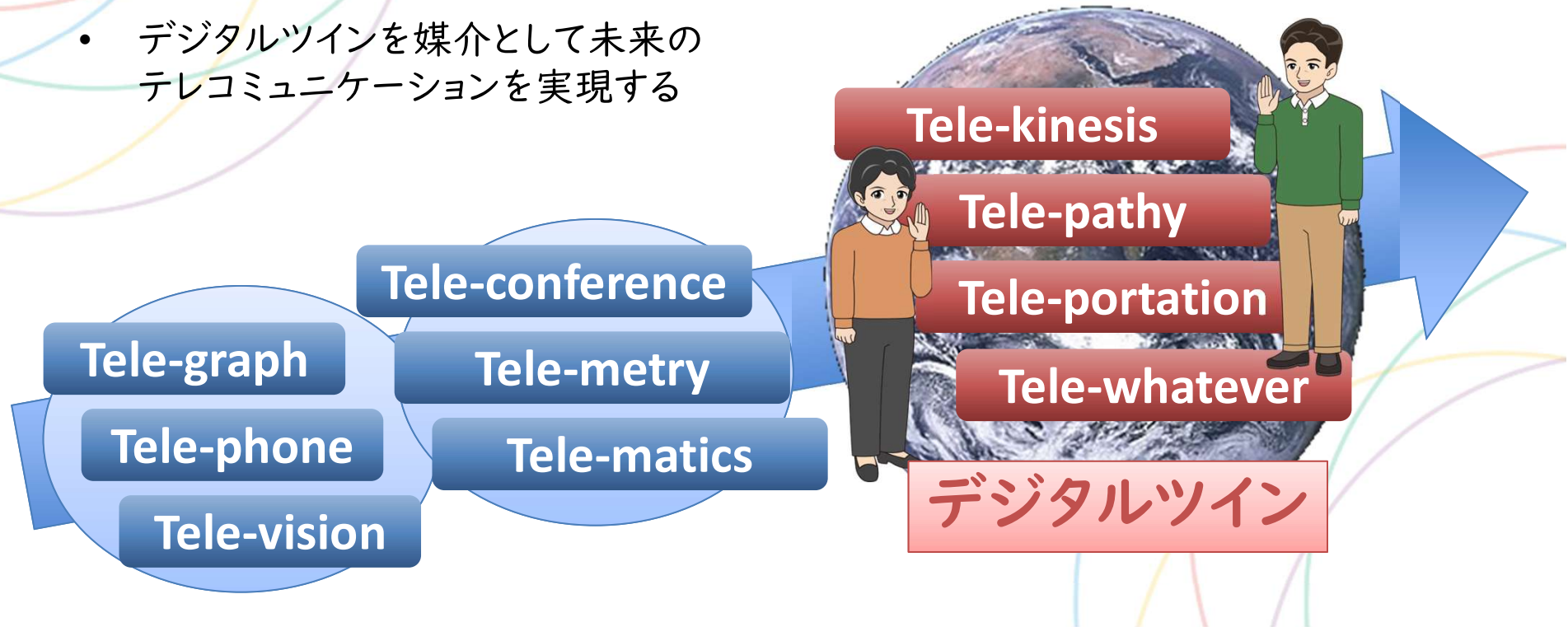
IoT



Source: <https://jpn.nec.com/nsp/5g/beyond5g/index.html>

“テレ”コミュニケーションの未来

- 「テレ=tele」とは、「遠く、遠隔の」という意味を持つ、英語の接頭辞。ギリシャ語の「tele (遠く)」に由来。
- デジタルツインを媒介として未来のテレコミュニケーションを実現する



10年後の波に乗るための、いま知るべき先進テクノロジー10選 ガートナー発表



• AIの最重要課題とリスク

- エージェント型AI (2~3年後)
- AIガバナンス・プラットフォーム (2~4年後)
- 偽情報セキュリティ (1~3年後)

• コンピューティングのニュー・フロンティア

- ポスト量子暗号 (2~3年後)
- 環境に溶け込むインテリジェンス (3~7年後)
- エネルギー効率の高いコンピューティング (3~5年後)
- ハイブリッドなコンピューティング・パラダイム (3~10年後)

• 人間とマシンの相乗効果

- 空間コンピューティング (1~3年後)
- 多機能型スマート・ロボット (3~10年後)
- 神経系の拡張 (10年以上後)

未来を考えるネタ – 本を読もう



- 学生に読ませた本をご紹介します



とりあえず定番モノ



SFは面白くて、“役に立つ”



進化/生物/歴史は道標

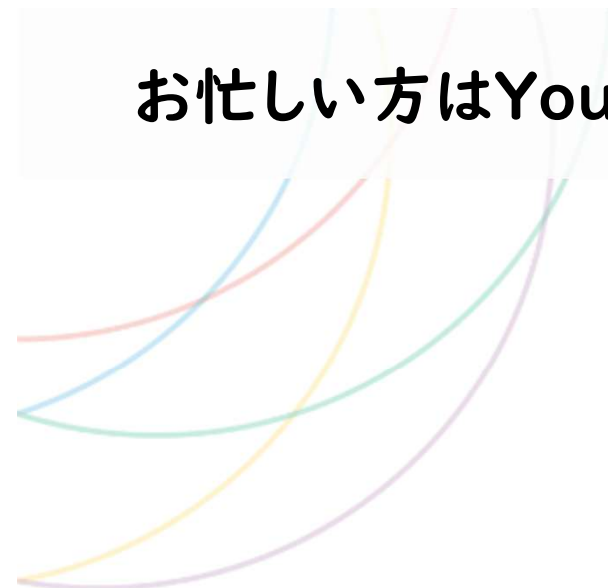
例) 社会のデジタルツイン



例) 人間のデジタルツイン



お忙しい方はYouTubeでどうぞ





そして現在

技術トレンド



- オープン化 (ORAN; Open Radio Access Network)
 - (無線)通信機器のインターフェースのオープン化により、マルチベンダの機器組み合わせてネットワークを構成
 - 大学や地域でも無線ネットワークの構築が容易になる(ローカル5Gの活用も)
- ソフトウェア化・仮想化 (vRAN; virtualized RAN)
 - (無線)通信機器が汎用サーバ上で動作するソフトウェアにより制御されるソフトウェア化が進展
 - 大学や地域でも新たな機能やサービスの社会実装が容易になる
- AIへの対応
 - AI for RAN: (無線)ネットワークの最適化制御へのAIの活用
 - RAN for AI: (無線)ネットワーク上でAIサービス(特にPhysical AI)を直接提供
 - RAN and AI: 無線信号処理とAI処理がGPUサーバ上にコロケーションする新しいアーキテクチャ

本日の議論

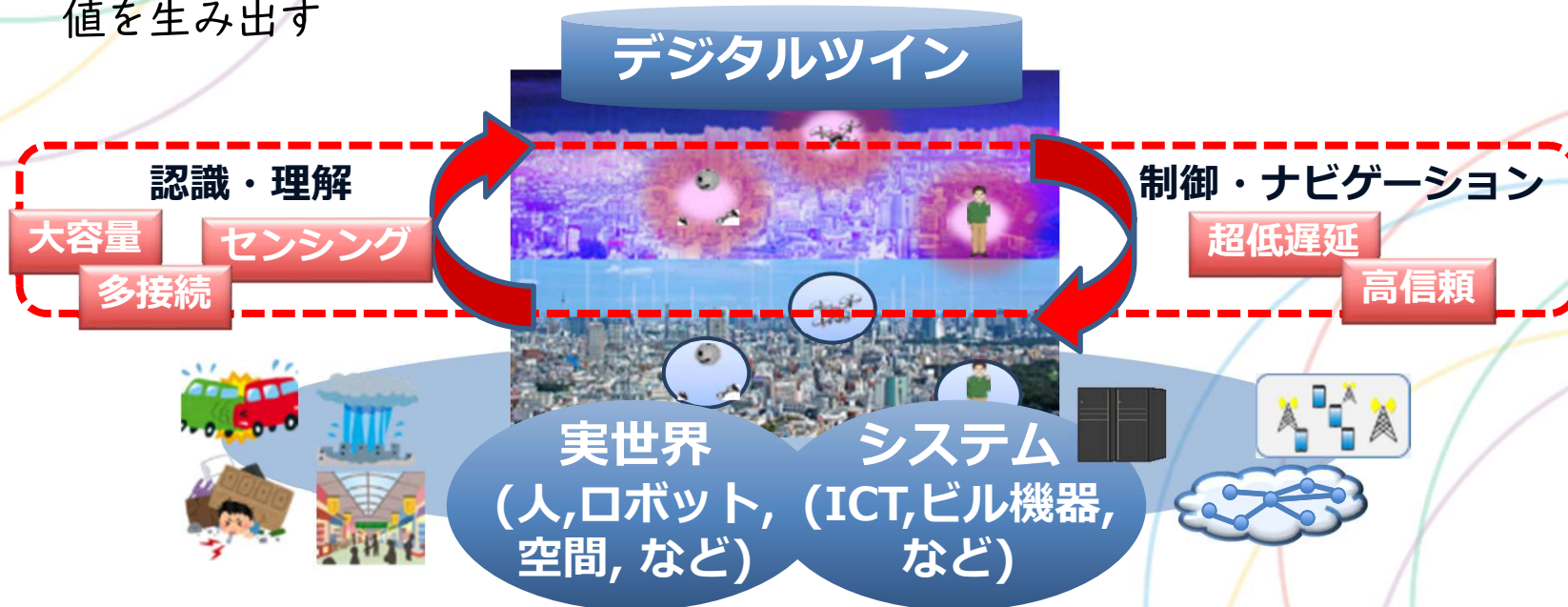
大学キャンパスをデジタルツイン化して共創の場とする

Beyond 5Gとデジタルツインについて考える

BEYOND 5Gとデジタルツイン について考える

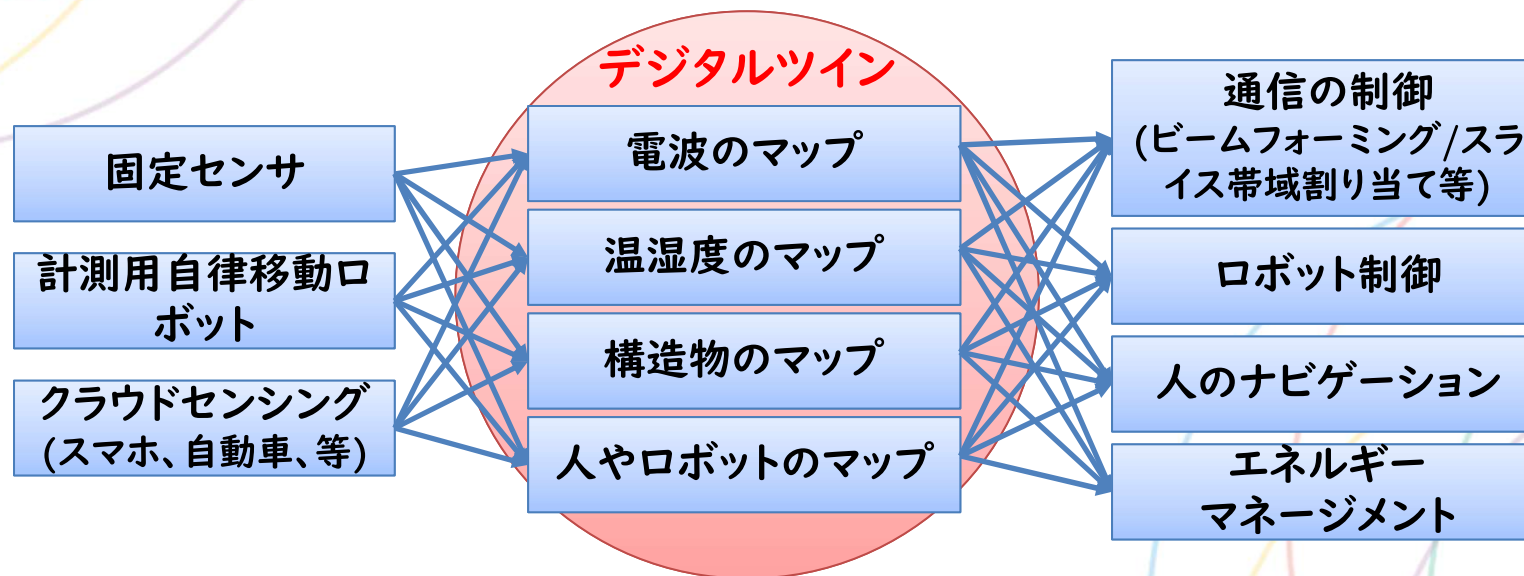
デジタルツインによる通信技術と実世界の融合

- デジタルツインによりサイバー空間(仮想世界)とフィジカル空間(実世界)がリアルタイムに同期
- 全ての人とモノがつながり、様々な知識や情報が共有され、今までにない新たな価値を生み出す



デジタルツインを媒介として多様なサービスが共進化する

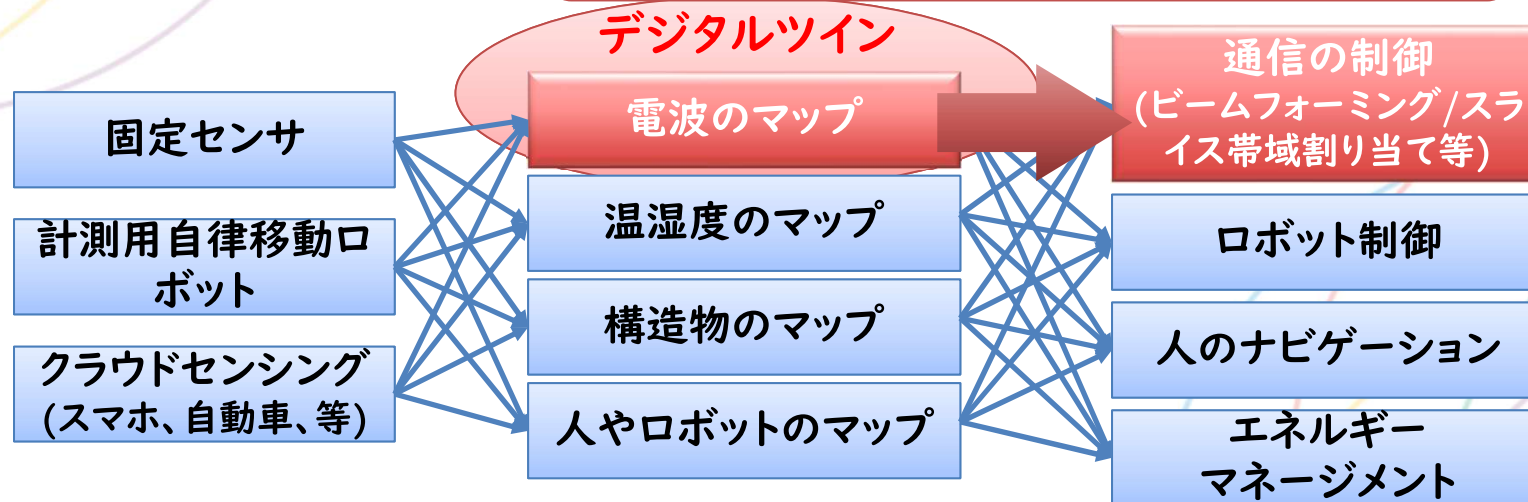
- 多様なデータ(デジタルツイン)を横断的に活用し、様々なサービスが協調・連携
- 縦割り(図では横割り)ではない、融合的な研究開発が今後重要に
- デジタルツインが鍵となる役割をはたす



デジタルツインを媒介として多様なサービスが共進化する

- 多様なデータ(デジタルツイン)を横断的に活用し、様々なサービスが協調・連携
- 縦割り(図では横割り)ではない、融合的な研究開発が今後重要に
- デジタルツインが鍵となる役割

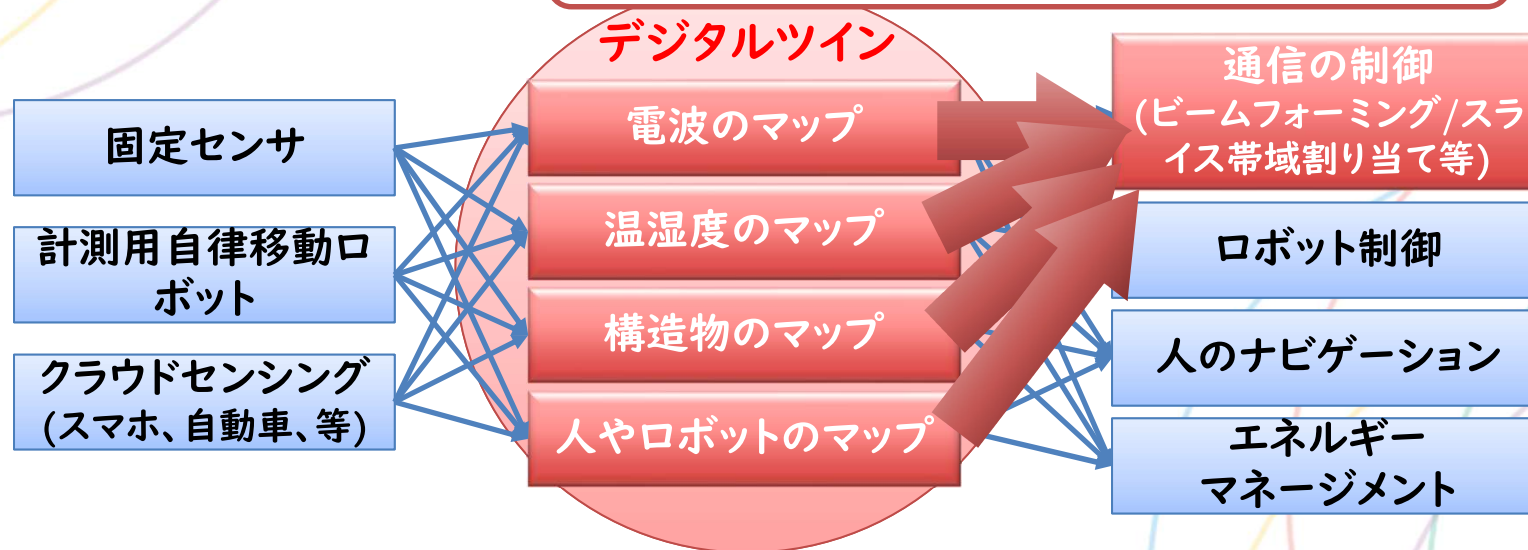
無線通信空間のデジタルツインを活用し、
Beyond 5Gを高度化



デジタルツインを媒介として多様なサービスが共進化する

- 多様なデータ(デジタルツイン)を横断的に活用し、様々なサービスが協調・連携
- 縦割り(図では横割り)ではない、融合的な研究開発が今後重要に
- デジタルツインが鍵となる役割

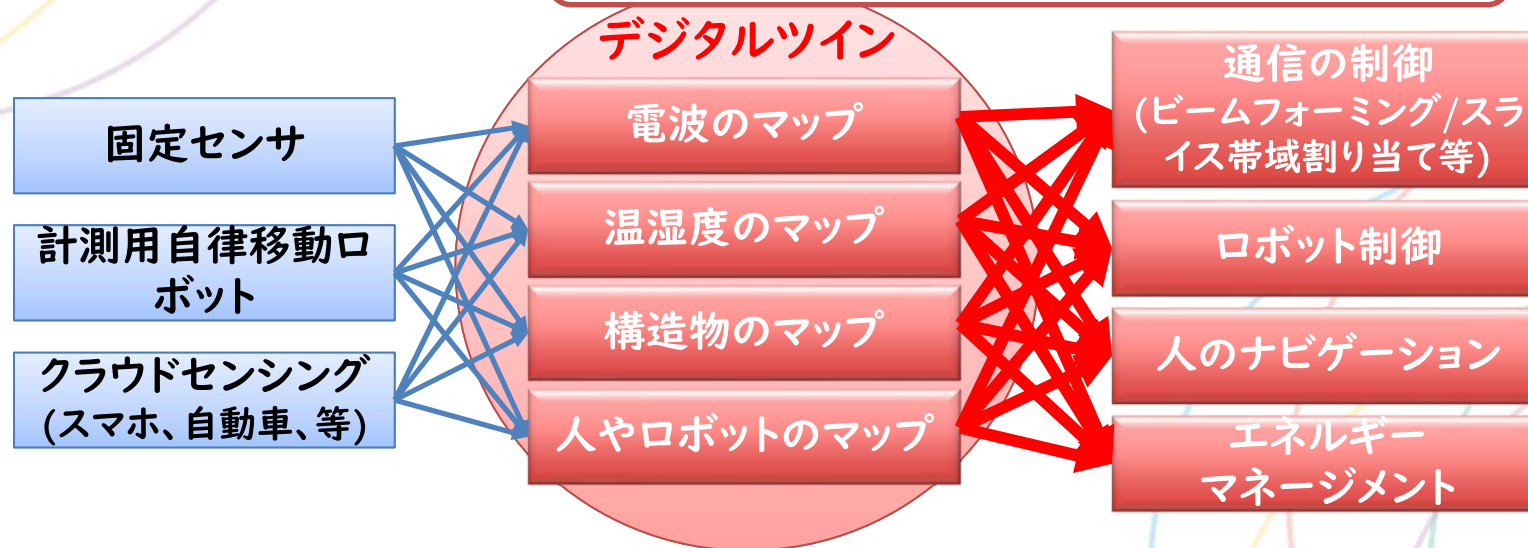
空間全体の多様なデジタルツインを活用し、
Beyond 5Gをさらに高度化



デジタルツインを媒介として多様なサービスが共進化する

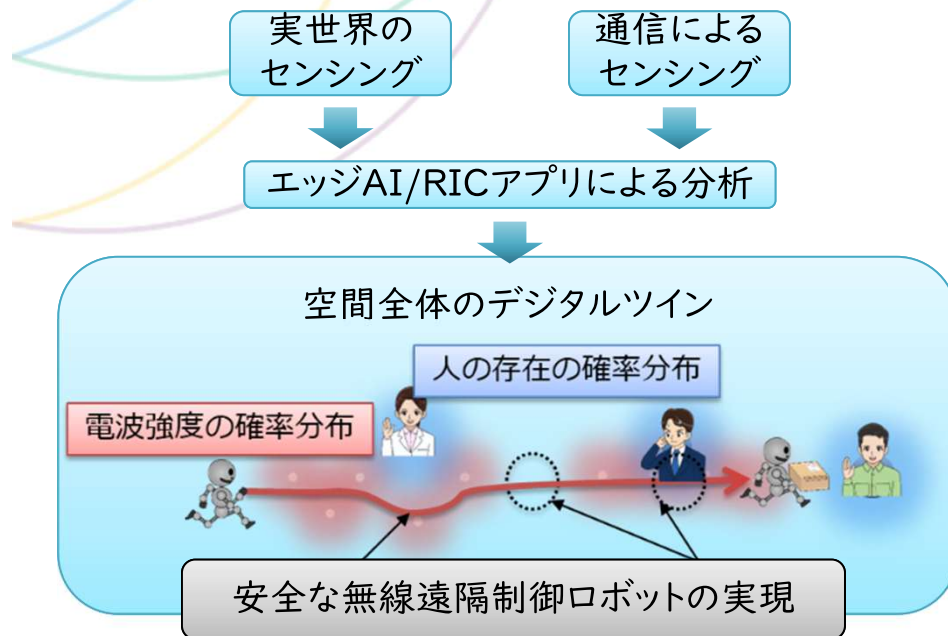
- 多様なデータ(デジタルツイン)を横断的に活用し、様々なサービスが協調・連携
- 縦割り(図では横割り)ではない、融合的な研究開発が今後重要に
- デジタルツインが鍵となる役

さらに、融合的な研究開発を推進

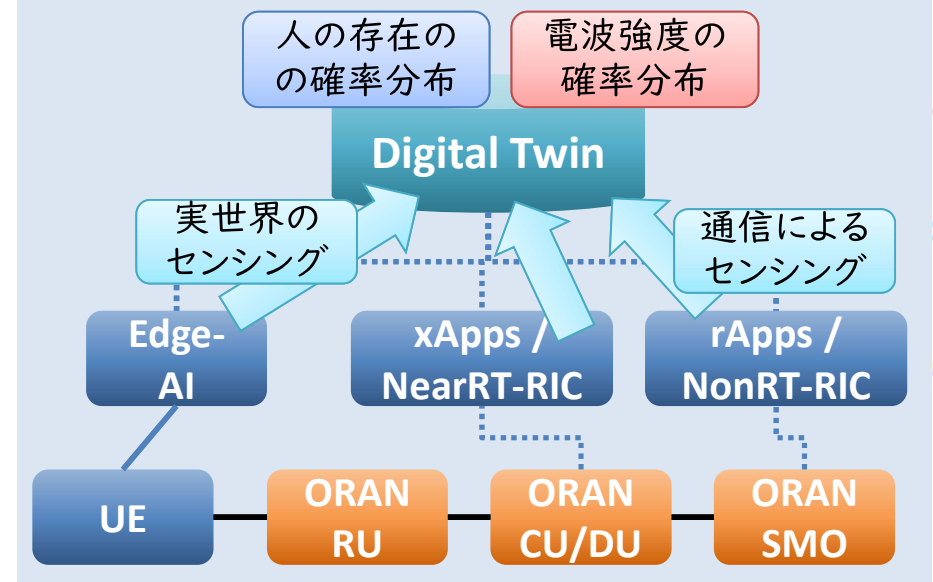


Byond5G/6G技術とPhysical AIの協調例 (I)

- 通信と実世界と両方のセンシングによって統合的にデジタルツインを構築

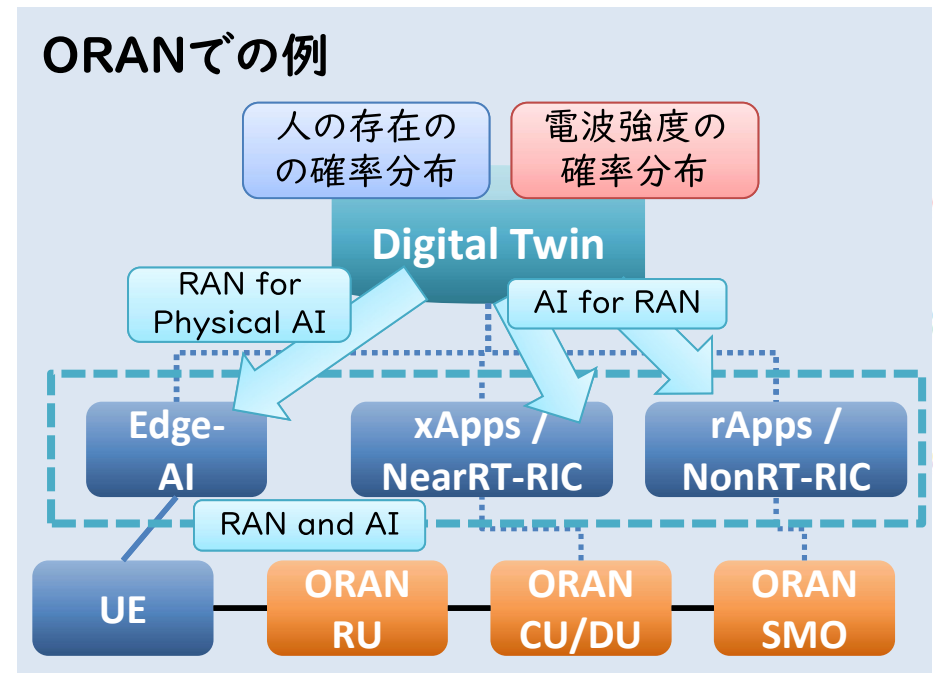
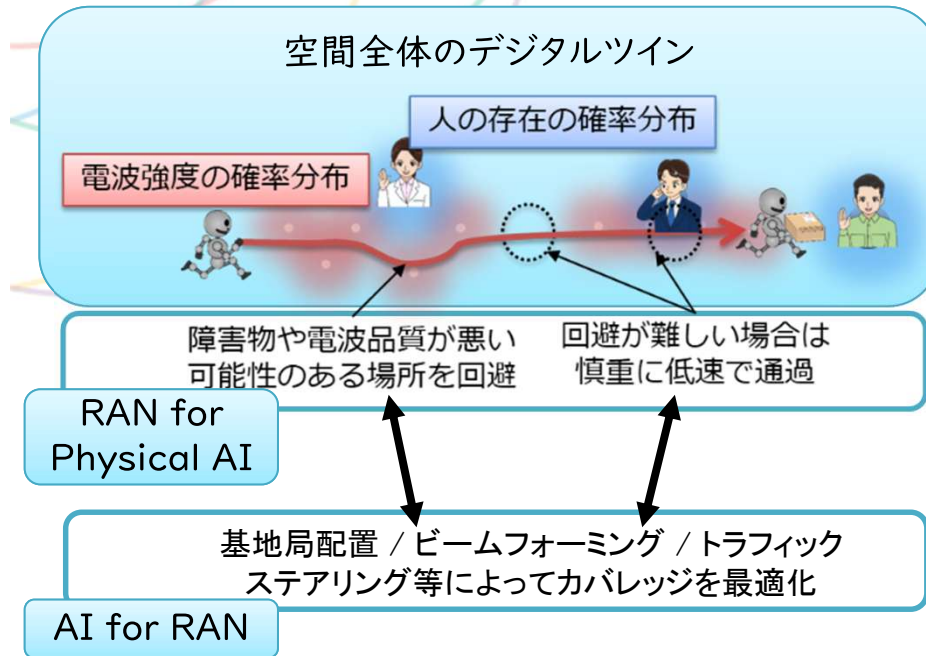


ORANでの例



Byond5G/6G技術とPhysical AIの協調例(2)

- デジタルツインを用いて通信と実世界を相互に最適化



現実世界をデジタルツイン化することについての課題



- Beyond 5Gの大容量通信能力と高度なAI認識能力によって、リアルタイムに実世界のコピーを生成したいが、、、
- 実世界を認識・制御する際の不確かさ
 - AI認識精度の限界
 - 無線通信状況把握/制御の困難さ、帯域や遅延の予測不可能性
 - モーター駆動の誤差や、人間の反応の不確実性
- 認識や制御の精度を向上させるため、リアルタイム性を補償するため、際限なく帯域や計算機性能を向上
 - 情報関連だけで2030年には年間42PWh(現在の世界の消費電力の2倍近く)の予想
 - 総カメラ台数が100億台に達すれば、さらに200Ebpsの上りトラフィックが発生
 - トラフィックの消費者が人間からAIに変わり、24時間休まずGPUが処理をし続ける

“確率的”デジタルツイン

- 現実世界の”不確定性”や”不確実性”に対処する現実的・実用的な枠組み
 - 「誤差を前提にした確率的な情報」に基づいた処理によって初めて、突発的事象や実世界の不確実性を許容することが可能になる

確定値ではなく確率
分布で世界を表現



確率に基づくリスク評価
によって世界を制御

認識の不確定性

認識能力の限界(精度、ノイズ、など)
計算能力の限界(偏在性、処理時間、など)
そもそも内在する不確定性(心の状態、など)

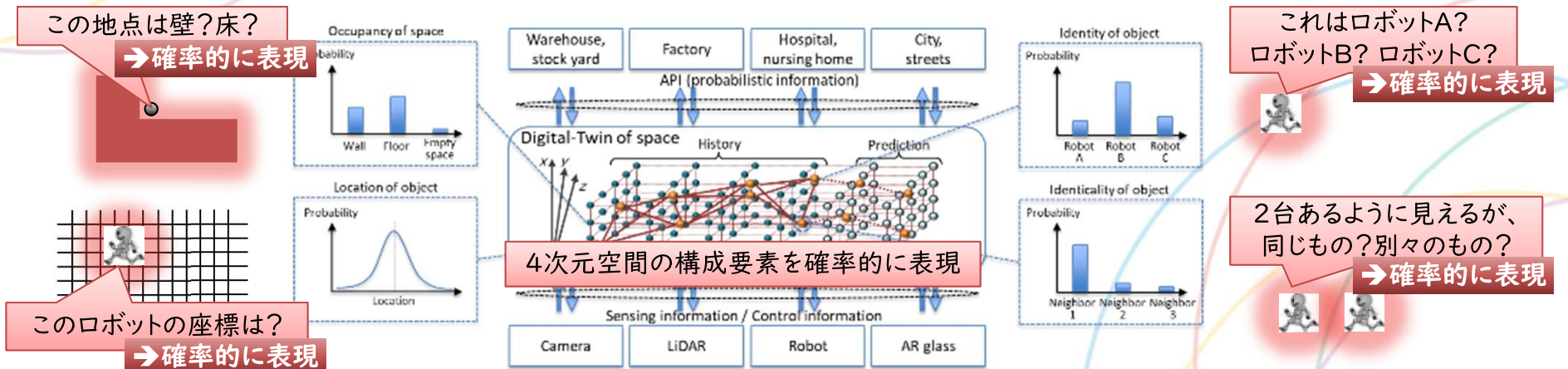
制御の不確実性



Probabilistic Representation and Its Application of Digital-Twin of Spatio-Temporal Real-World Toward Trustable Cyber-Physical Interactions



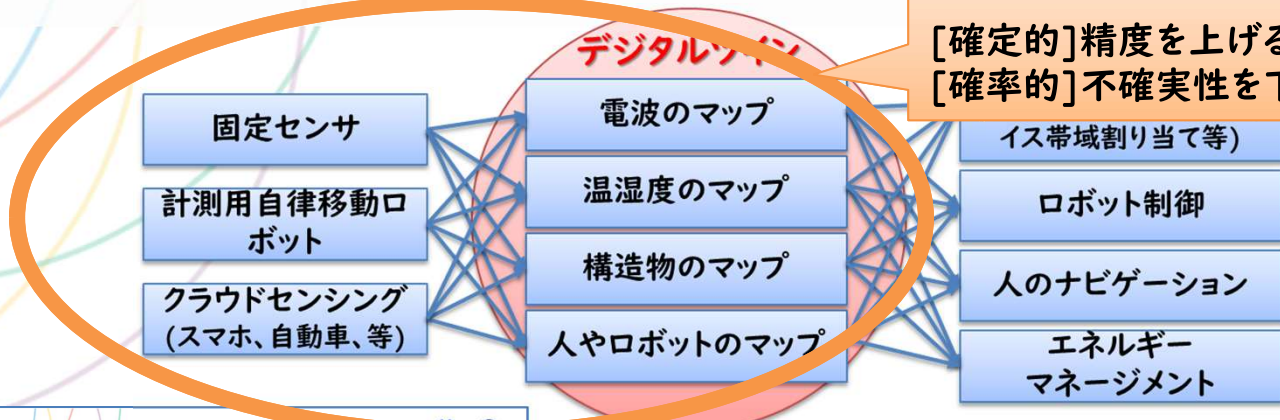
- 確率的な表現によって時空間を記述するモデルを構築し、その上で実世界と仮想世界とのインタラクションを定義
 - 不確実な観測結果から確率的に実世界を推定し、
 - 非決定論的に未来を予測し、
 - 予測されるリスクや価値に基づいてロボット制御や人のナビゲーションを行う



H. Shimonishi et al., "Probabilistic Representation and Its Application of Digital-Twin of Spatio-Temporal Real-World Toward Trustable Cyber-Physical Interactions," in IEEE Network, vol. 38, no. 6, pp. 130-137, Nov. 2024

計測/分析に関連する研究

計測技術の進化
 [確定的]精度を上げる
 [確率的]不確実性を下げる



移動ロボットによる空間計測 (電波/温度/etc.)

移動ロボットによる空間計測 - パスプランニング

- Uncertainty-driven path planning based on Spatio-Temporal Gaussian Process Regression (ST-GPR)
 - センサー搭載ロボットにより空間の温湿度や電波分布などを自動計測
 - が最小になるようにロボットの移動経路をプランする環境でも短時間で計測を完了

介護施設におけるデジタルツインの活用

- デジタルツインを活用して心の状態の理解・予測や適切なコミュニケーションのきっかけづくりを行う実証を開始
- 介護施設における認知症高齢者の心と予測の実現可能性について検証を実施し、リハビリの手法を用い、実際の介護現場に研究成果を実証し、社会実装に活動中。

サーモカメラを用いた車いすからの転倒検知

評価結果

Input feature	Front level performance			Exact level performance			Full sc. obj. accuracy in TP context		
	TSP (F1)	TP (Precision)	FP (Recall)	TSP (F1)	TP (Precision)	FP (Recall)	TSP (F1)	TP (Precision)	FP (Recall)
Cov	0.931	0.286	0.934	0.935	0.114	0.930	2.12 (100%)	2.1 (100%)	2.1 (100%)
Bbox-Cov	0.938	0.853	0.724	0.942	0.607	0.607	2.12 (100%)	4.6 (100%)	4.6 (100%)
CLS	0.796	0.475	0.831	0.96	0.688	0.835	4.6 (100%)	4.6 (100%)	4.6 (100%)
Bbox-Cov-CLS	0.780	0.851	0.823	0.929	0.809	0.809	4.6 (100%)	4.6 (100%)	4.6 (100%)
Bbox-Cov-CLS-Angle	0.816	0.75	0.808	0.92	0.8	0.812	3.1 (100%)	3.1 (100%)	3.1 (100%)
Bbox-Cov-CLS-Angle-TP	0.771	0.478	0.814	0.929	0.478	0.825	1.0 (20%)	4.6 (100%)	4.6 (100%)
Bbox-Cov-CLS-Angle-TP-TP	0.652	0.608	0.817	0.929	0.809	0.809	2.0 (40%)	3.1 (100%)	3.1 (100%)
Bbox-Cov-CLS-Hist change	0.774	0.529	0.804	0.929	0.809	0.809	3.0 (100%)	3.0 (100%)	3.0 (100%)
Bbox-Cov-CLS-Hist change-TP	0.774	0.527	0.813	0.929	0.817	0.809	4.6 (100%)	4.6 (100%)	4.6 (100%)
Bbox-Cov-CLS-Angle change	0.740	0.424	0.816	0.929	0.808	0.812	0.714	4.0 (80%)	3.0 (100%)
Bbox-Cov-CLS-Angle change-TP	0.682	0.660	0.822	0.929	0.809	0.809	4.6 (100%)	4.6 (100%)	4.6 (100%)
Bbox-Cov-CLS-Angle change-TP-context	0.682	0.658	0.824	0.929	0.809	0.809	3.0 (100%)	3.1 (100%)	3.1 (100%)

マルチカメラによる3次元トラッキング

- 複数のカメラを用いて空間を立体的に捉えることにより空間内の人やロボットの3次元位置を高精度で推定
- 条件付確率場(CRF)を用いて推定を行い、その結果から3次元位置を高精度で推定

映像分析システムの分散化による省電力化

- 端末/エッジ/クラウドでの分散処理を動的に最適化
- 認識精度/遅延時間要件を満たしつつシステム全体(AI+通信)の消費電力を低減

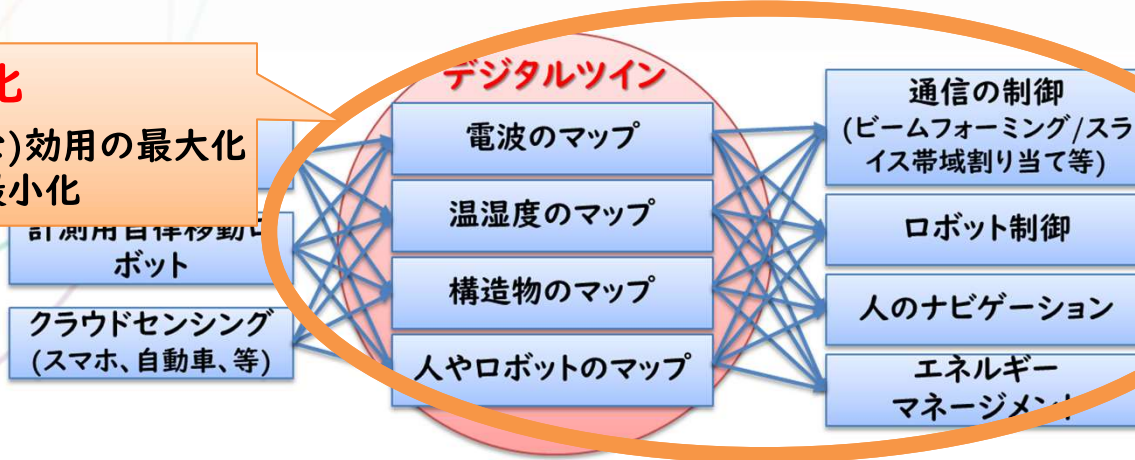
ミリ波無線通信環境の確率的な推測

- ロボット遠隔制御等においては電波状況の把握や予測が重要。しかし困難。
- マルコフ確率場(MRF)を用いて電波環境を確率分布で推測する方式を提案
- ロボットのリスク回避動作等に活用

制御/最適化に関する研究

制御技術の進化

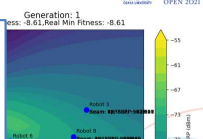
[確定的] (平均的な) 効用の最大化
[確率的] リスクの最小化



ミリ波ビームフォーミング最適化

ミリ波ビームフォーミング最適化

- 実用上の使い勝手を考えて、フェーシング等の影響を精密に計測/推測するのではなく、確率分布としてざっくり推測



スマートビル / Software-Defined Building

- ソフトウェアによってビルを再定義
 - ハードウェアとしてのビル
 - ベンダ/所有者/利用者/開発者

ソフトウェアによって再定義されたビル

スマートビル / Software-Defined Building



- 温度分布
- 人流
- 個人情報
- これらの情報を収集

電波マップを用いたドローン遠隔操作の支援

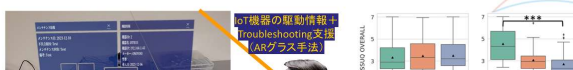
- ドローンの事故原因のうち技術的要因としては無線電波環境の問題が多い
- 電波という見えないものをどのように立体的に操縦者に提示するか?
- 3種類のAR表示について、21名の被験者による主観/客観評価実験を実施

ARによる電波マップの提示



IoT機器のトラブルシューティング支援

- スマートビルやスマートホームにたくさんのIoT機器が設置され、無線ネットワークに接続し、制御や駆動情報管理されている
- IoT機器は数が多く判別が困難な上、時間の経過に伴って機器構成情報の記録台帳が不正確になりがち
- トラブルシューティング支援 + 作業情報自動記録のシステムを提案し、ARグラスとタブレットにおける身体的負荷や心理的負荷を比較計測



ARグラスを用いたロボットとの協調作業

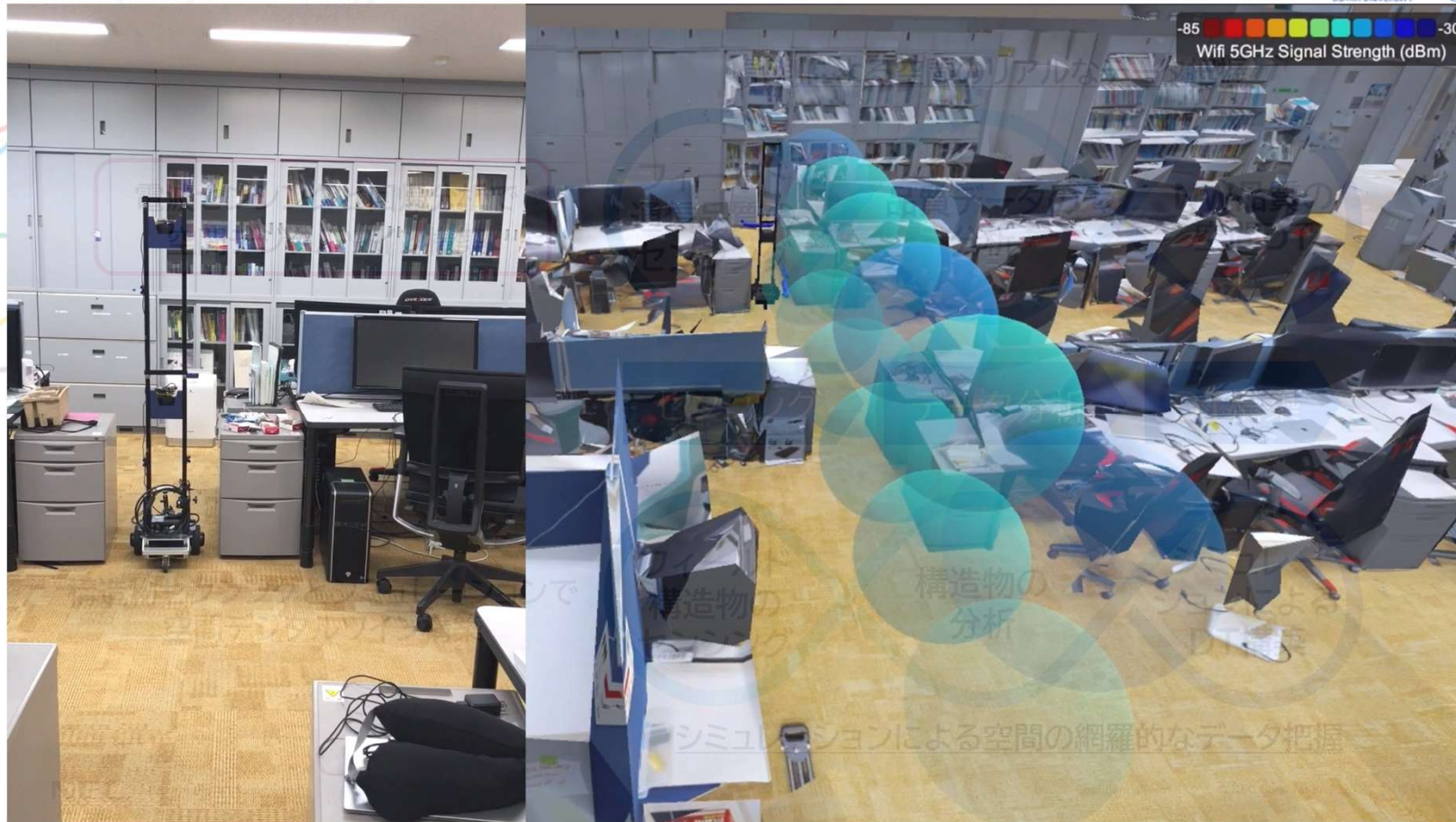
- 人とロボットの安全な共存のためには、リアルタイムに人やロボットの挙動を把握し、ロボット側に高度な制御が必要
- ロボットだけが頑張るのではなく、ARグラスを用いて人間の挙動を“制御”できるか?
- ロボットの情報をARグラスで提供し、システム開発とUI評価を行った → 人間の特性のモデル化





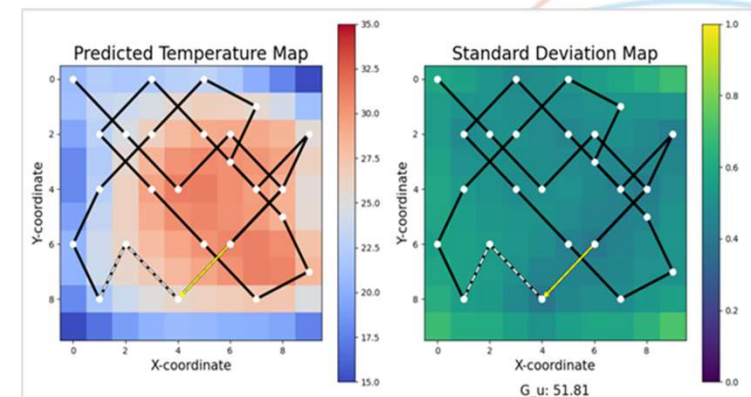
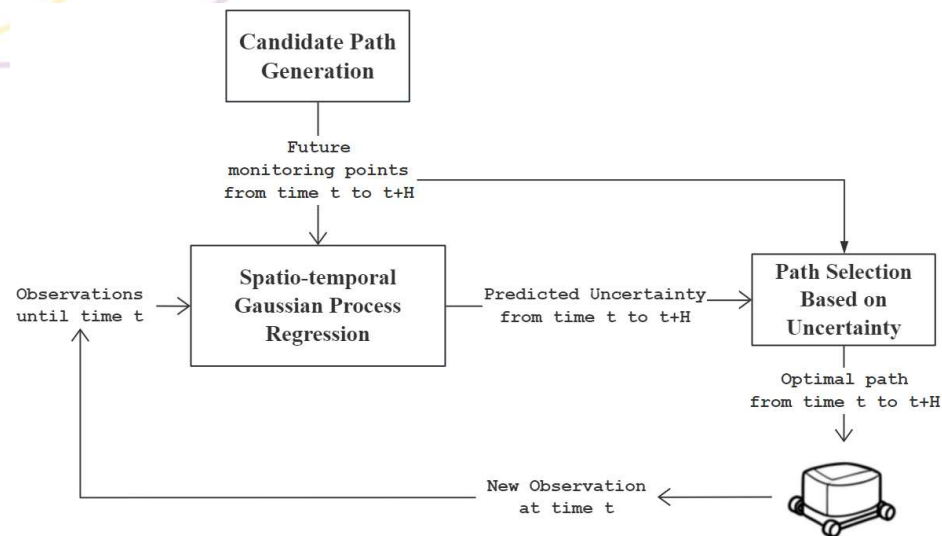
いくつかの研究開発の例

自律移動ロボットによる“確率的”電波環境マップの構築



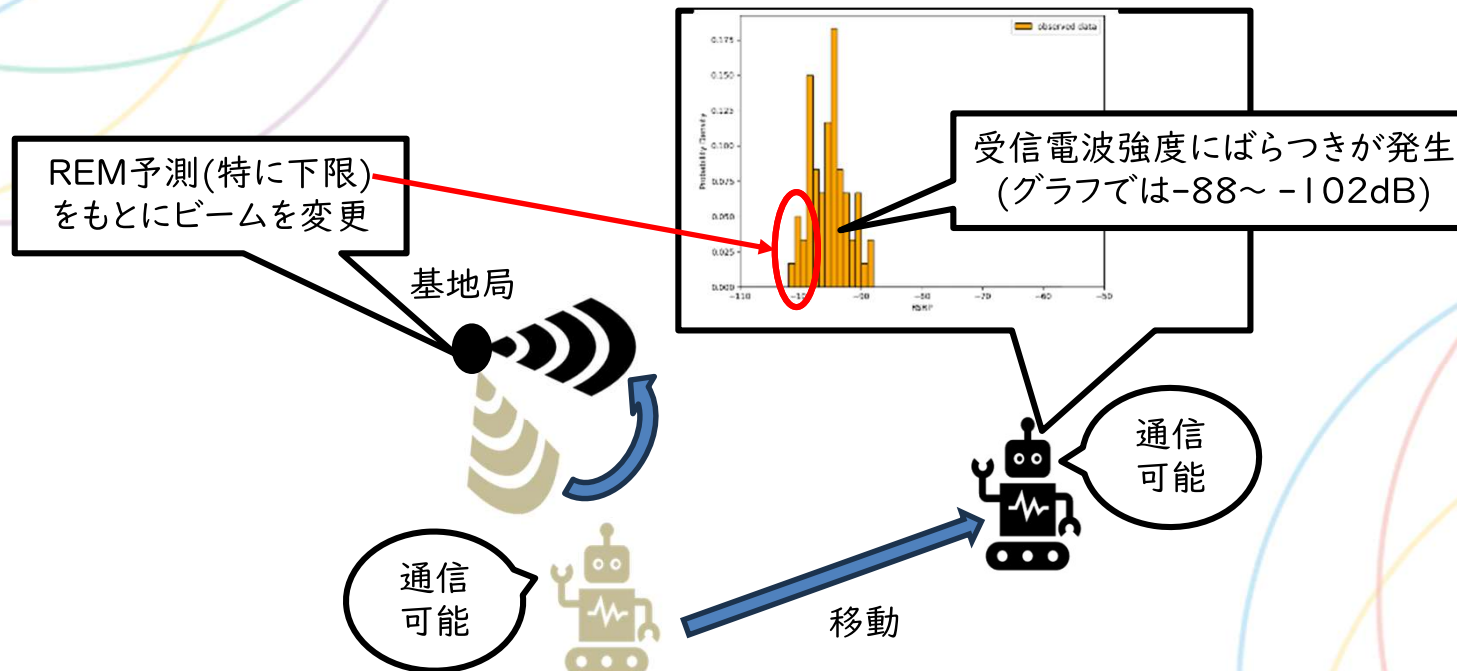
自律移動ロボットによる空間計測 – パスプランニング

- Uncertainty-driven path planning based on Spatio-Temporal Gaussian Process Regression (ST-GPR)
 - センサー搭載ロボットにより空間の温湿度や電波分布などを自動計測
 - 空間全体の計測値の”不確かさ”が最小になるようにロボットの移動経路をプランニングすることで、動的に変化する環境でも短時間で計測を完了



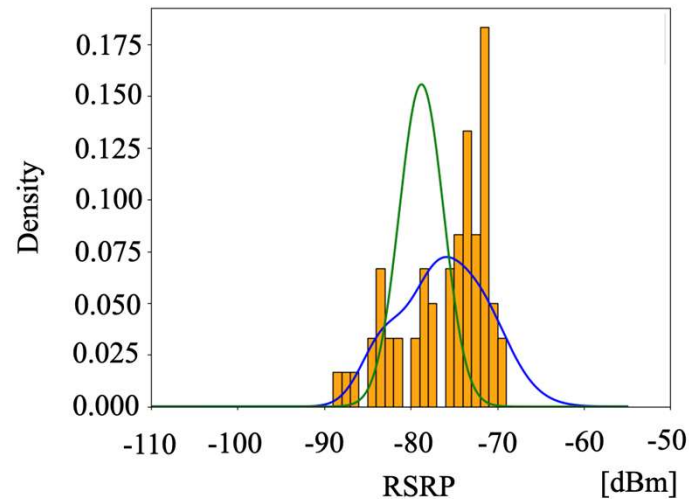
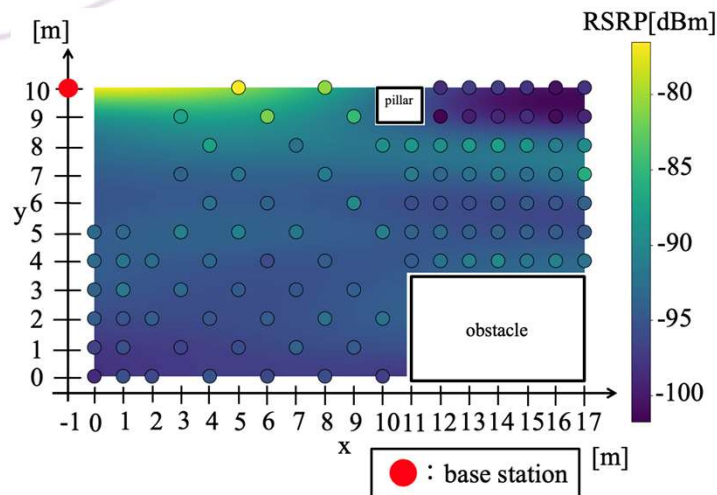
ミリ波無線通信環境の推測によるロボット制御

- 安定したロボット制御のため、空間内の電波強度を表す電波マップ(REM)を活用
 - 移動中にロボットに対してダイナミックにビームフォーミングを最適化できる



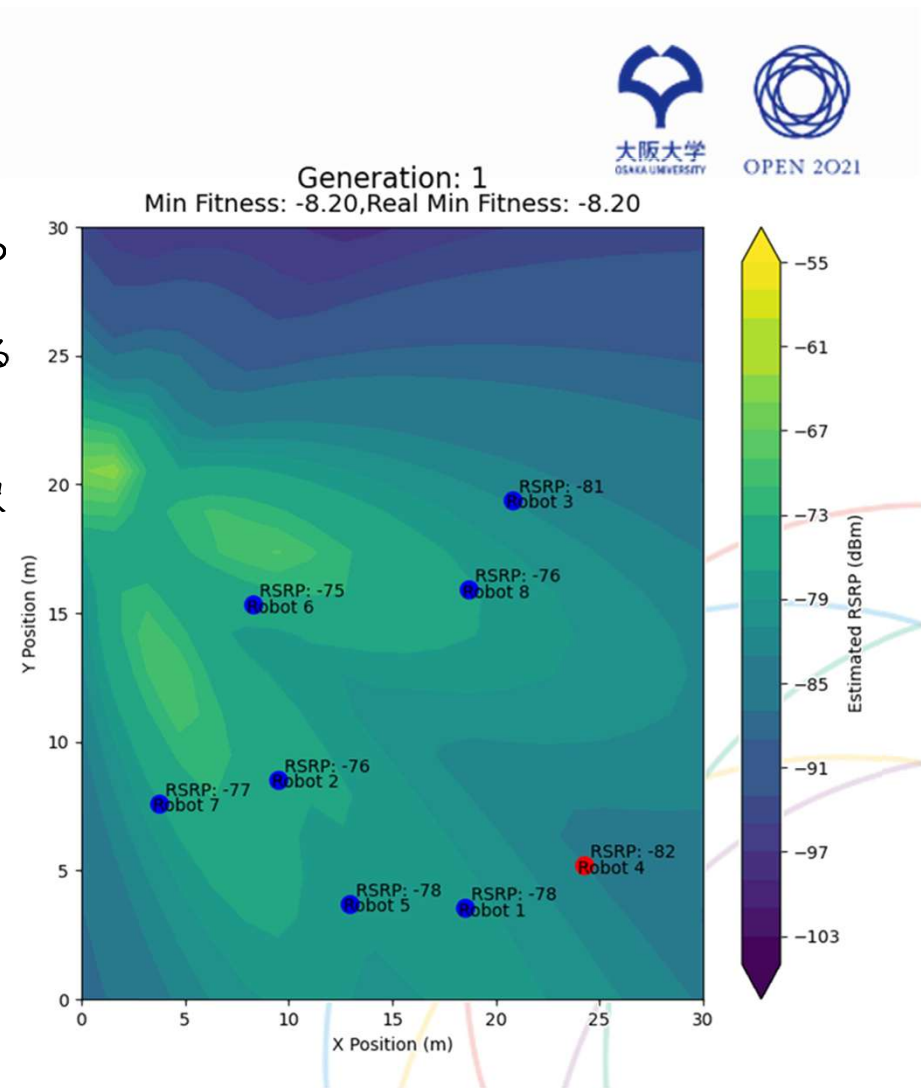
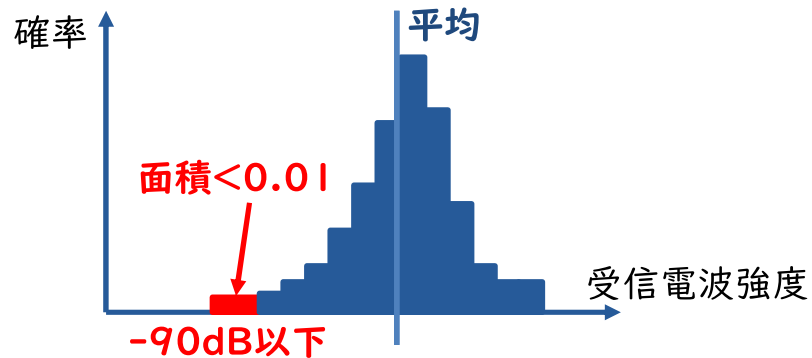
ミリ波無線通信環境の確率的な推測・分布の再現

- 空間内の数地点の観測情報をもとに、ガウス過程回帰によって空間全体の”確率的電波マップ”を推測する
 - ガウス過程回帰を学習させたトランスフォーマ(PFNs)にベイズ推論させることで、大規模環境でも高速に電波マップを計算
 - PFNsをガウス分布から混合ガウス分布へ拡張することで電波強度の分布を再現



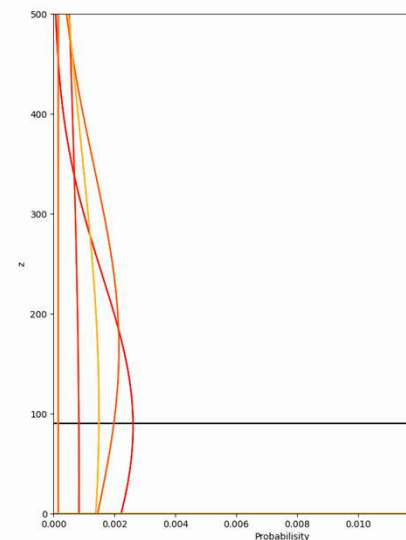
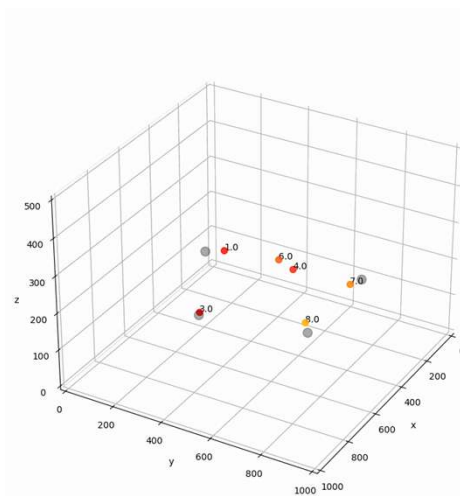
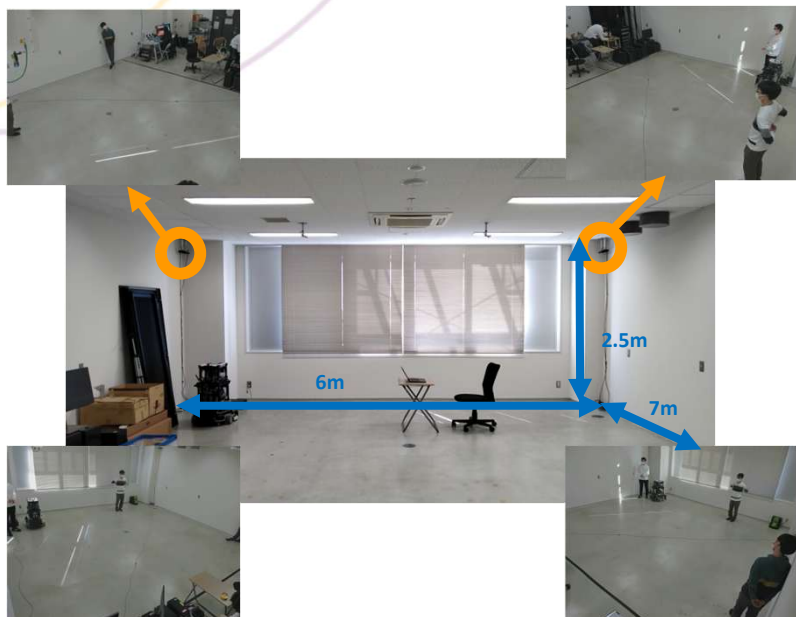
ミリ波ビームフォーミング最適化

- 品質条件を満たすロボットの台数が最大となるようにビームパターンを動的に変更
 - 各ロボットの受信電波強度が -90dB 以下となる確率を 1% 以下とする
 - 遺伝的アルゴリズムにて毎ステップ 100 個のビームパターンを評価し、最良のパターンを選択



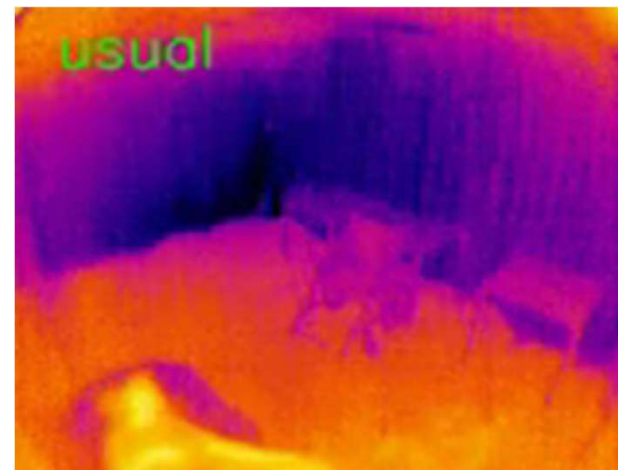
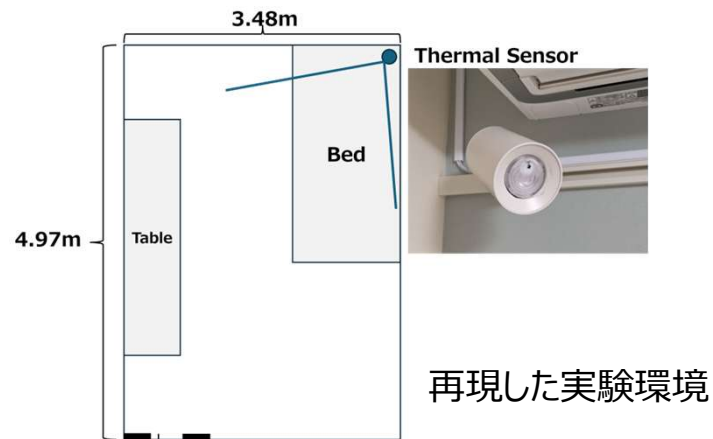
マルチカメラによる3次元トラッキング

- 複数のカメラを用いて空間を立体的に捉えることにより、空間内の人やロボットの3次元位置を高精度に推定
 - 条件付確率場(CRF)を用いてカメラ間のオブジェクト同定
 - カルマンフィルタとベイズ推定を用いてトラッキング

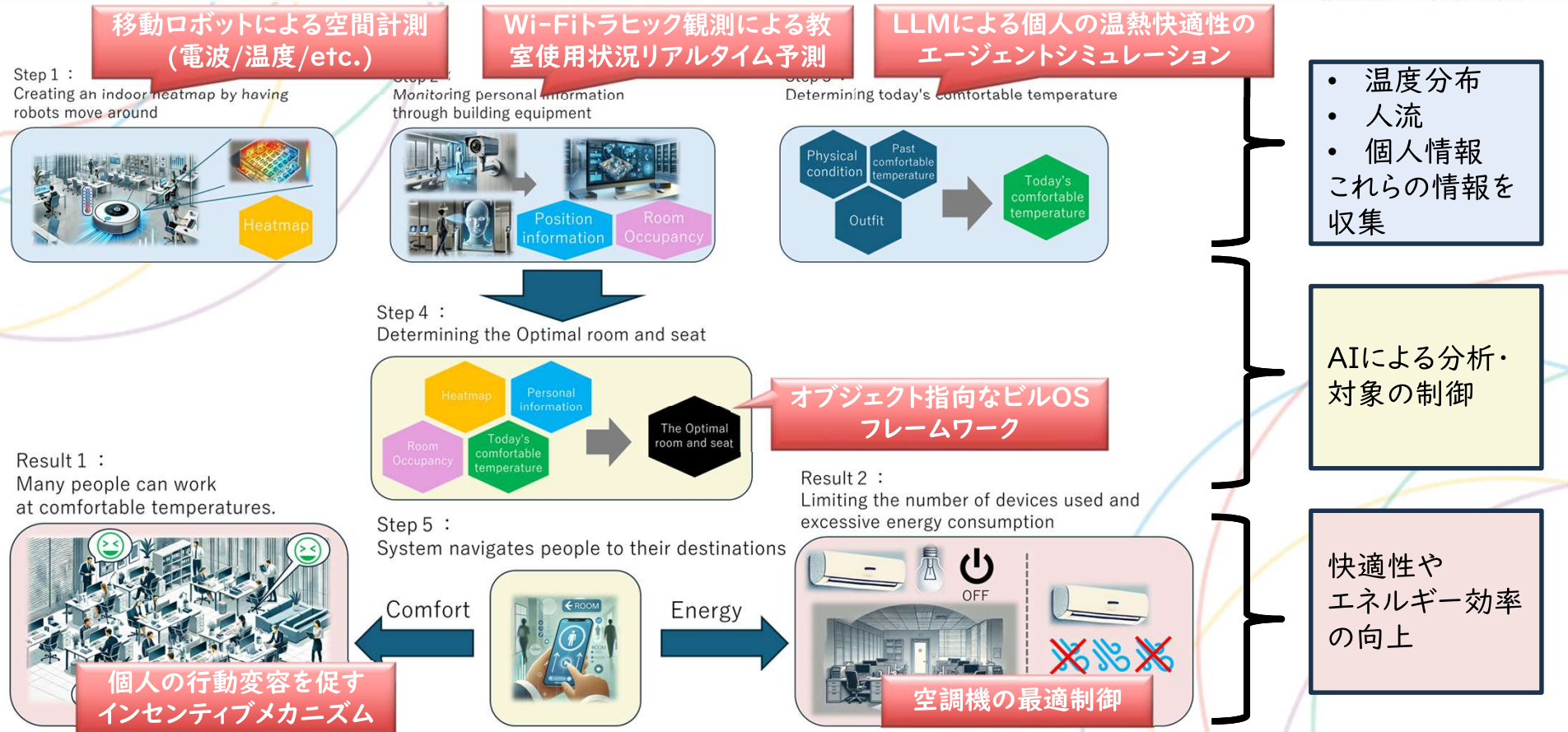


サーモカメラを用いた車いすからの転倒検知

- 高齢者施設の課題
 - 高齢者施設において夜間、個室内の状況がわからないため、介護士が訪室する必要がある → 負担が大きい、転倒等緊急時に即座に対応することが困難
 - 個室内はプライバシーに関する要件が複雑であり、一般的なカメラの使用は困難
- サーモカメラでは既存の深層学習モデルでの検知/特徴量抽出が困難
 - 既存の深層学習モデルに加えて胴体中心の特徴量を追加して精度を向上させる
 - 時系列解析により、転倒中の挙動を推定し、転倒とずり落ちを識別する



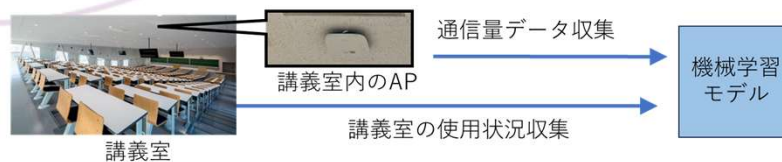
スマートビル / Software-Defined Building



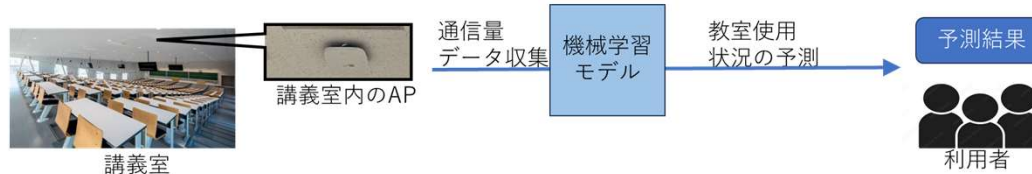
Wi-Fiトラフィック観測による教室使用状況リアルタイム予測

- 講義室の実際の利用状況をリアルタイムに把握することは難しい
 - 講義情報システムは必ずしも正確ではない(休講/遠隔講義等)
 - 全ての教室にセンサを配置することも難しい
- →WiFi APデータを用いてリアルタイムに使用状況の予測を行う

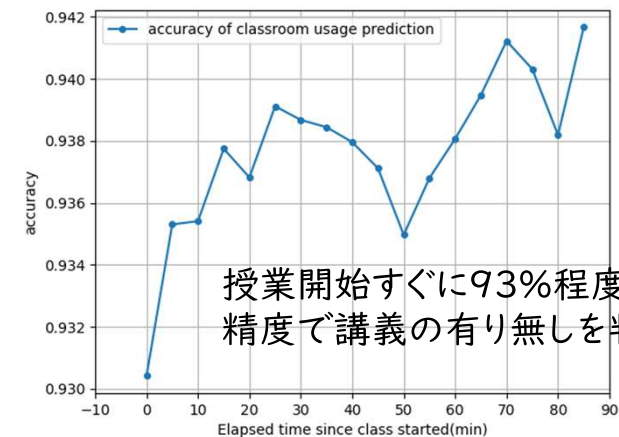
1. 収集したデータと実際の講義室使用状況でモデルを訓練



2. 収集した通信量データから、その時限の教室使用状況を予測



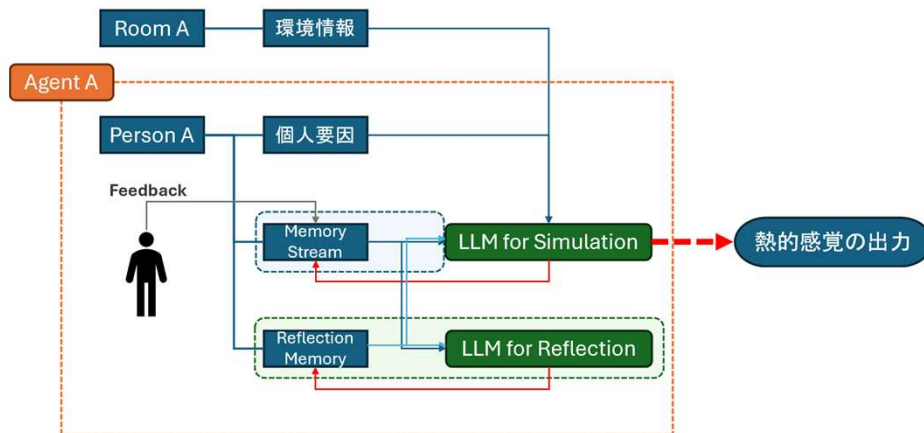
評価結果: accuracy



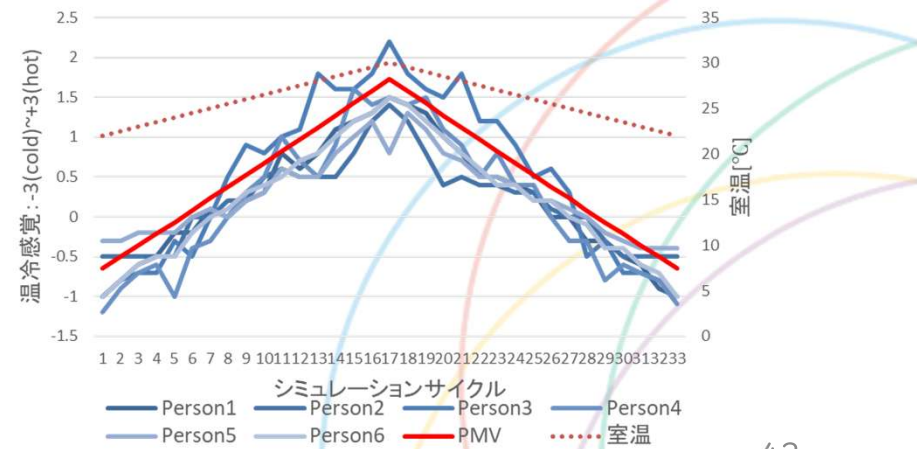
LLMによる個人の温熱快適性のエージェントシミュレーション

- 快適性について利用者個人の快適性をビルOSに取り込む方法を検討
 - PMV(Predicted Mean Vote):集団の平均的な快適性を評価するため個人差を考慮しない
 - 大規模言語モデル(LLM)により広範な人間行動をシミュレーション

Memory Stream/Reflection memory
により個人の行動をフィードバック



各エージェントの熱的感覚のシミュレーション
(室温を22℃→30℃→22℃と変化させた場合)

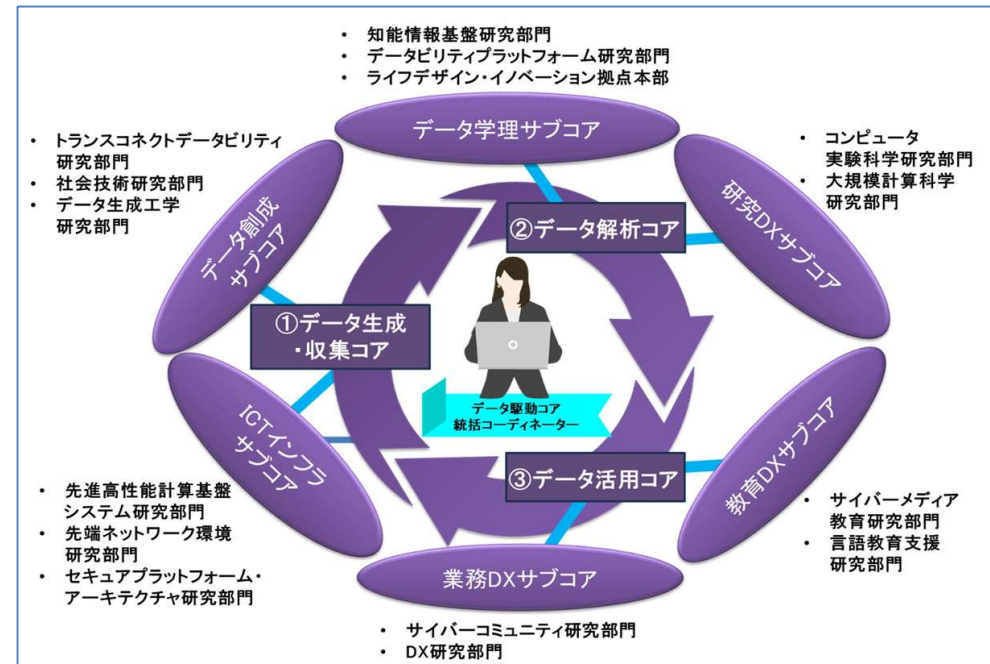




大学キャンパスをデジタルツイン化して 共創の場とする

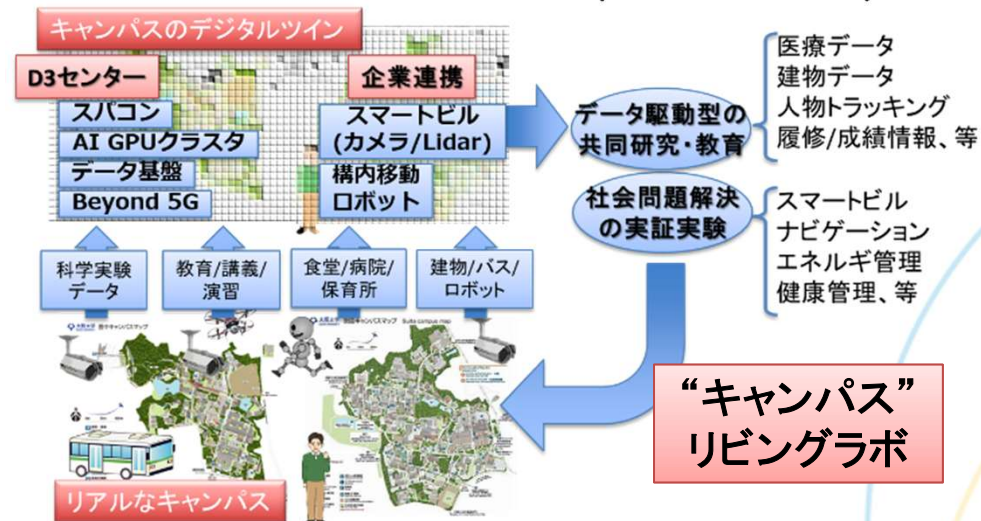
データ駆動型大学を目指し「D3センター」を設置

- 大阪大学は、データ駆動型大学を目指し、サイバーメディアセンターとデータビリティフロンティア機構を統合し、「D3センター」を設置(2024年10月)
 - Digital design
 - 情報をデータ化・使えるように
 - Datability
 - 高度かつ膨大なデータを解析・使いやすく
 - Decision intelligence
 - 様々な意思決定を支援する
 - 3つの”D”の相乗効果を創出する組織整備



大学キャンパスのリビングラボ化

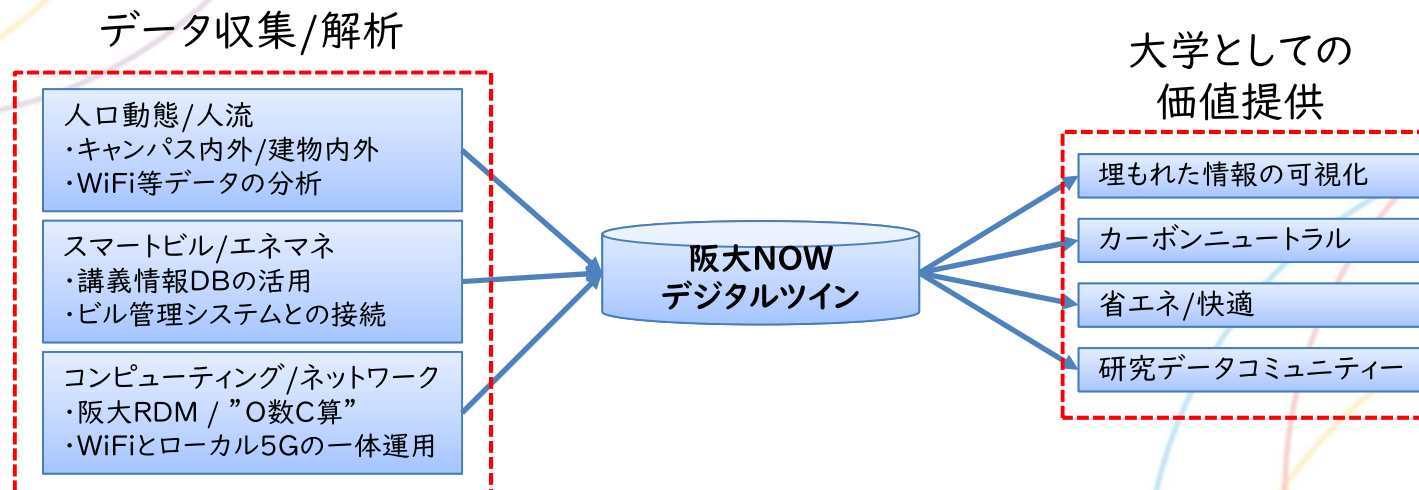
- 大学キャンパスのポテンシャル
 - キャンパス=教育/研究、道路/建物、商店/食堂/保育園/病院など”社会の縮図”
 - キャンパス=学生や地域住民、病院利用者などが”生活する場”
 - キャンパス=産・官・学が連携して”新しい技術を生み出す場”
- キャンパスをデジタルツイン化し、共創の場(リビングラボ)として活用



大学キャンパスを活用したデジタルツインの研究



- 大阪大学をデジタルツイン化する
- 大学を実験場として産官連携の強化する
- 最初からベータテスター3万人(教職員/学生)を想定して研究テーマを作る



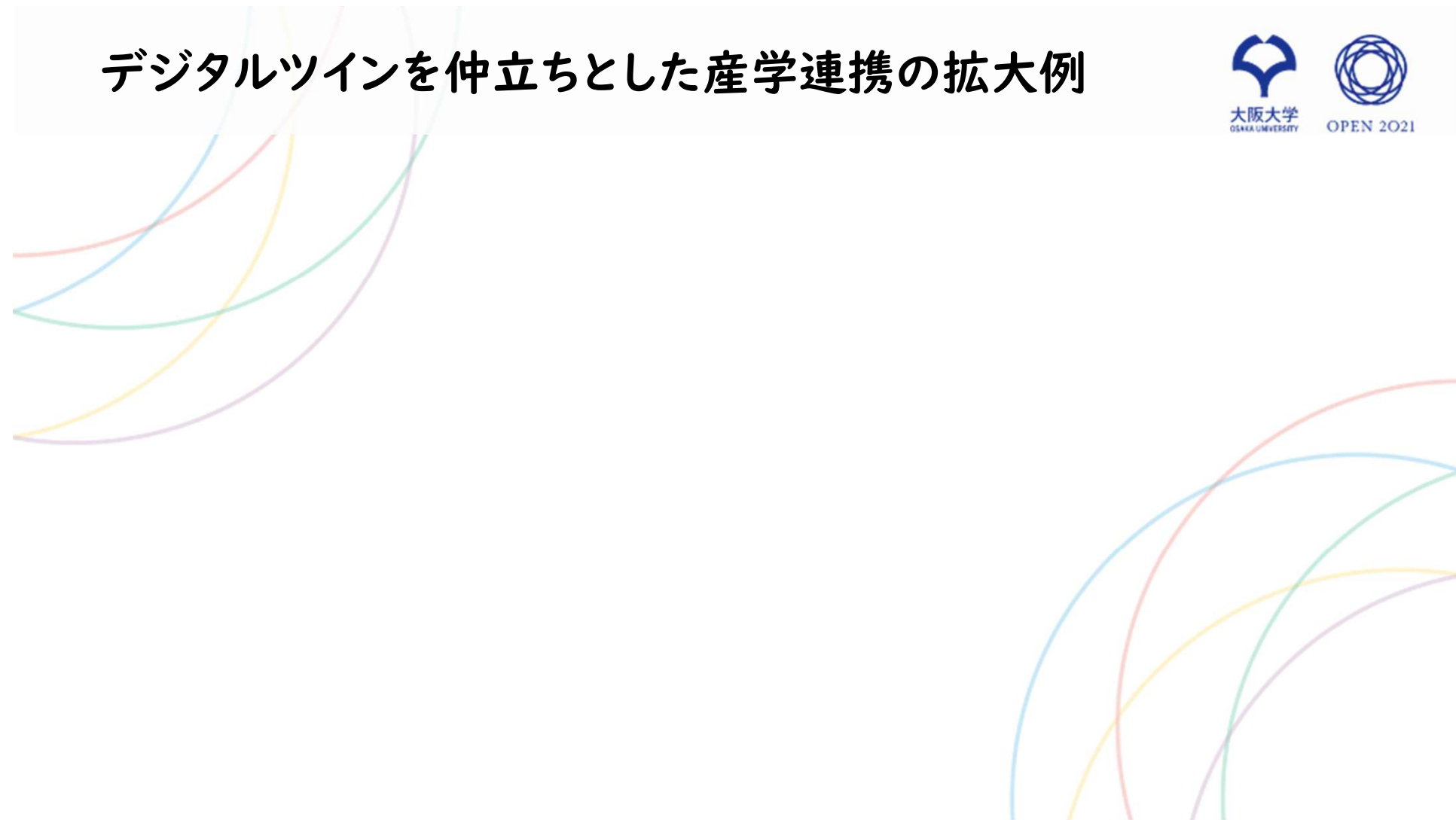
デジタルツインを仲立ちとした産学連携の拡大例



大阪大学
OSAKA UNIVERSITY



OPEN 2021



ビジョン：大阪大学Living 6G Testbed





大阪大学
OSAKA UNIVERSITY



OPEN 2021

まとめ

まとめ

- 過去を振り返る/未来を想像する
 - バックキャストして技術の進化を考える
 - 自らの想像力を最大化する
- そして現在
 - Beyond 5Gとデジタルツインの共進化を目指す
 - 大学キャンパス/地域を共創の場とする