

# 人とロボットの協働環境を支える VRデジタルツイン

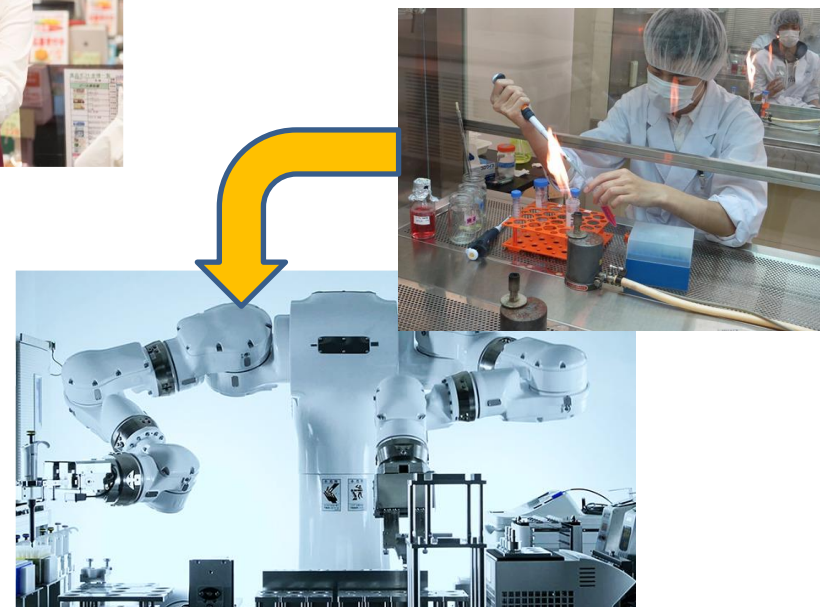
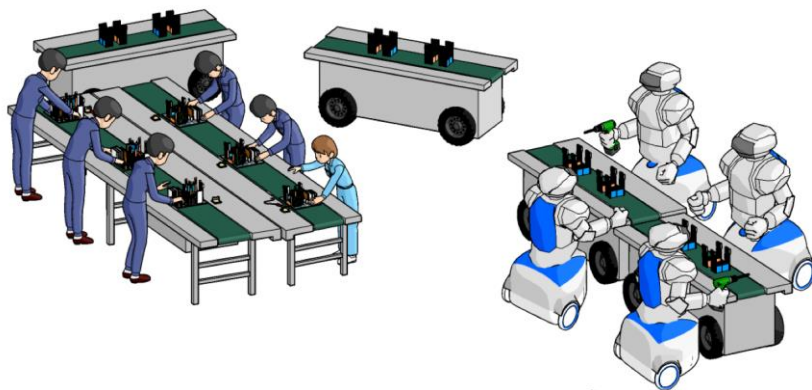
玉川大学 脳科学研究所

稲邑 哲也



# 背景・目的

人とロボットが共同作業をする中で，人の行動・ロボットの行動の双方が共進化していくためのフレームワーク構築



# 近年のロボット行動学習のトレンド

- 予測に基づく学習
  - ワールドモデル
  - モデルベースト強化学習
  - 深層強化学習
  - 深層予測学習
- マルチモーダル基盤モデル
  - LLM
  - CLIP
  - PaLM-E , RT-1 , RT-2 , Gato
  - 3D-LLM

# ワールドモデル

- Ha, David, and Jurgen Schmidhuber. 2018. "World Models."
- 我々は世界を大まかに抽象化し，将来の予測をしながら行動を決定している
- AI/ロボットが持つ抽象化された世界のモデル

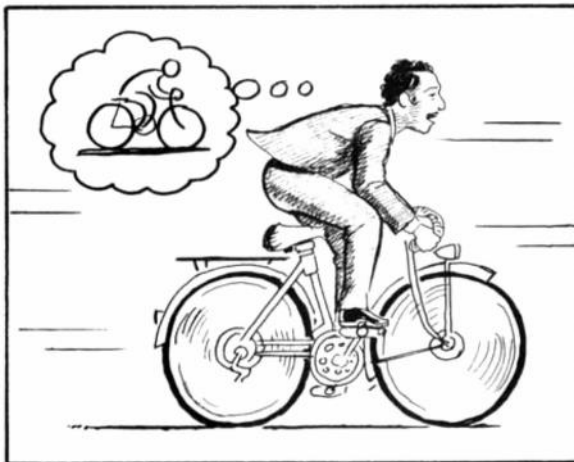
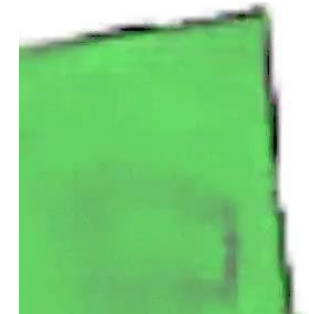
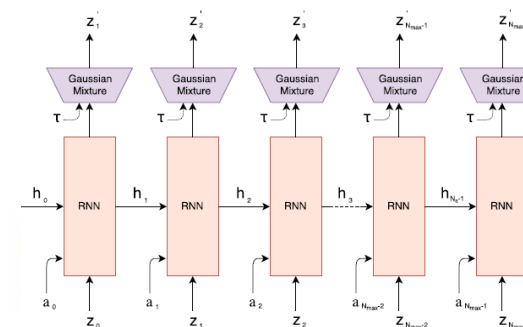
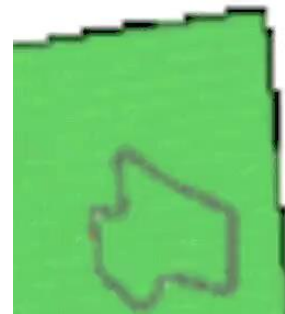
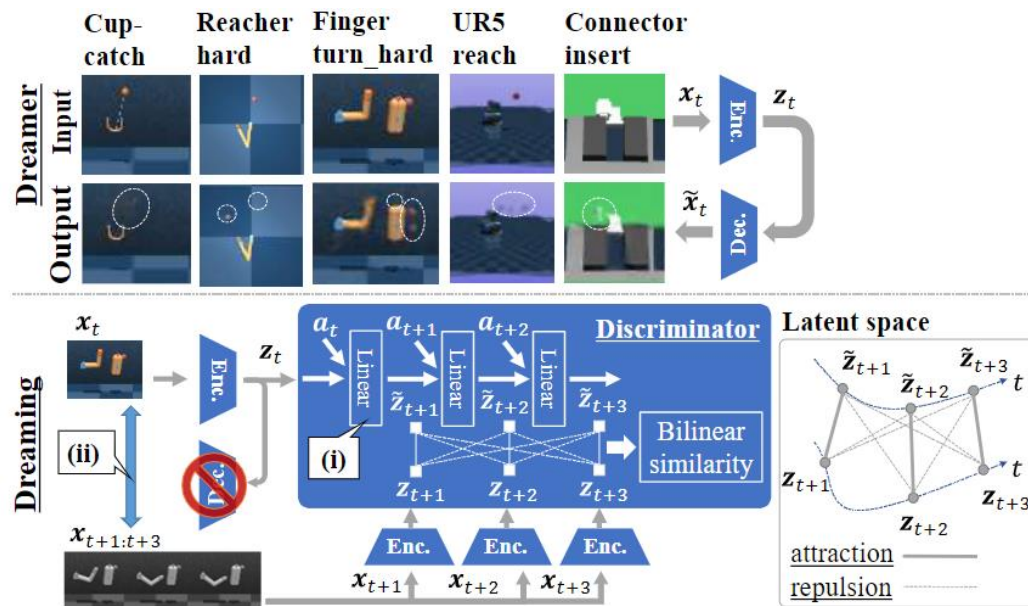


Figure 1. A World Model, from Scott McCloud's *Understanding Comics*. (McCloud, 1993; E, 2012)



# ワールドモデル+ロボットの典型例

- モデルベース強化学習
- Dreamer / Dreaming 潜在変数空間（ワールドモデル）内での学習
- DayDreamer Dreamer の学習を実機ロボットで実現



# 近年のトレンドにおける課題点

- 予測に基づく学習
  - ワールドモデル
  - モデルベースト強化学習
  - 深層強化学習
  - 深層予測学習
- マルチモーダル基盤モデル
  - LLM
  - CLIP
  - PaLM-E , RT-1 , RT-2 , Gato
  - 3D-LLM

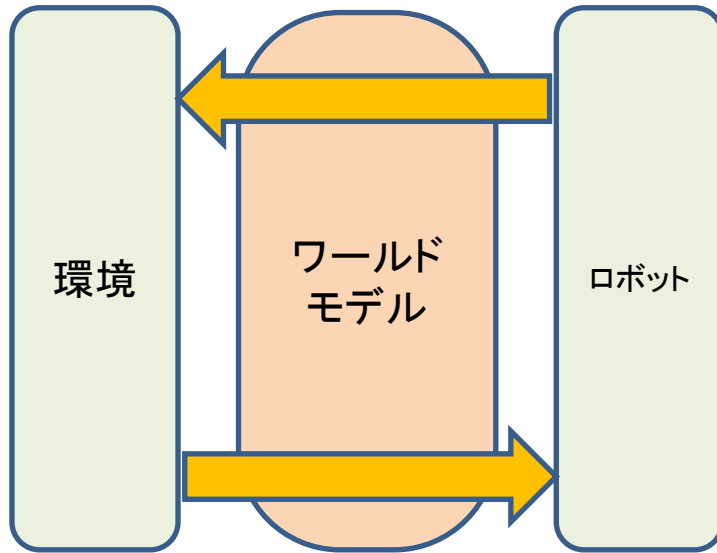
人・ユーザの行動に関するデータ  
モデルがほとんど対象となっていない

## 理由

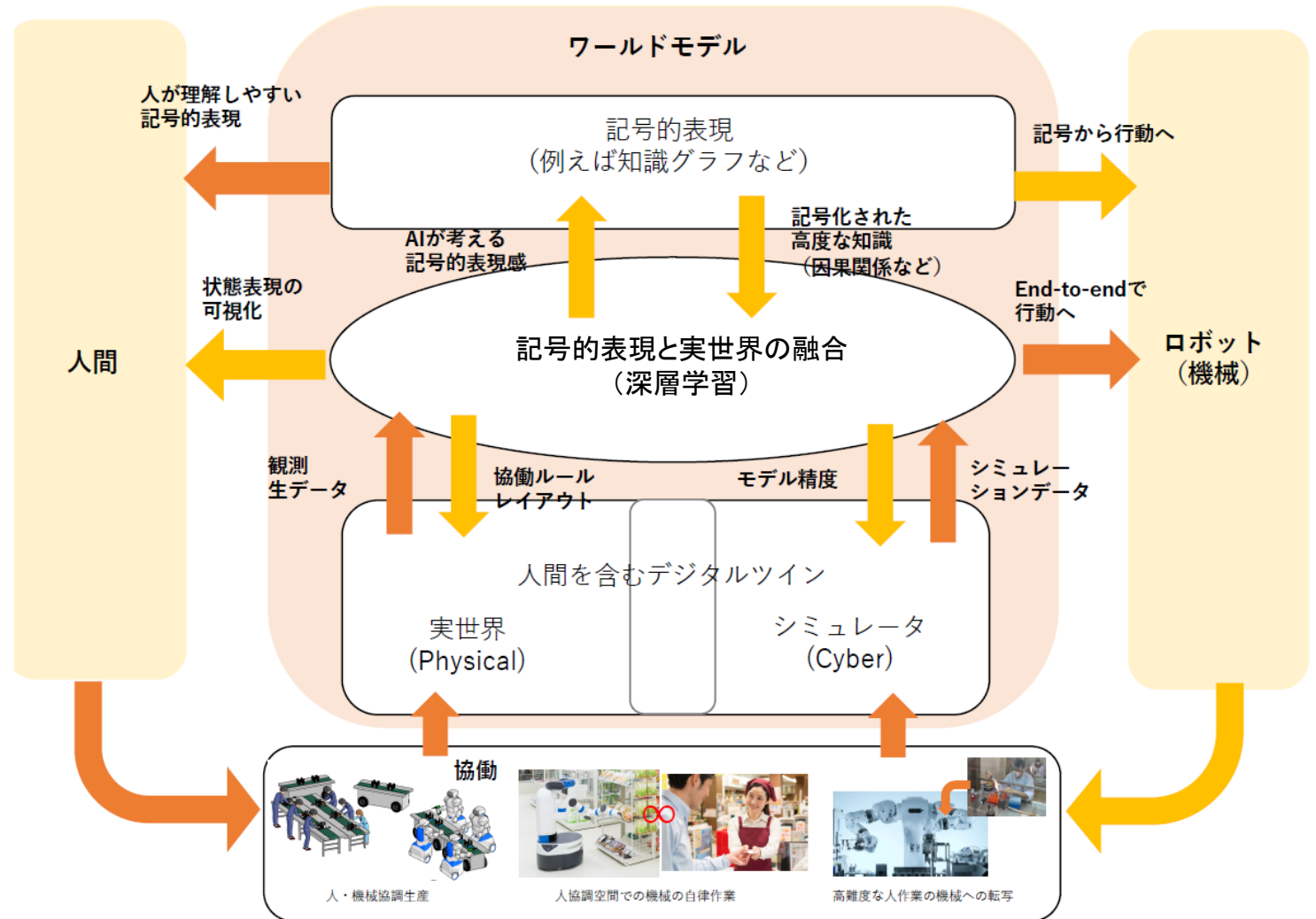
- 人とロボット間のインタラクションデータを収集するコスト
- 人の行動データの不確実性の大きさ

# 人とロボットの協働のためのワールドモデル

人の存在がないワールドモデル  
(従来の研究アプローチ)



人が存在するワールドモデル  
(我々の提案アプローチ)





# 現状の課題

- ロボットが獲得したワールドモデルを人が理解できるとは限らない
- 人の行動をワールドモデルで表現/学習する事例は皆無
- 人の行動とロボットの行動を同時に表現するワールドモデルはさらに複雑で困難
  
- その理由
  - 人の行動とロボットの行動の双方を同時に観測し、マルチモーダルな情報＋言語情報をデータベース化するプラットフォームの欠如
  - 実空間での人・ロボットの行動データと、シミュレーション上での行動データの乖離
  - 人の行動を改善するためのフィードバック系との連携の困難性



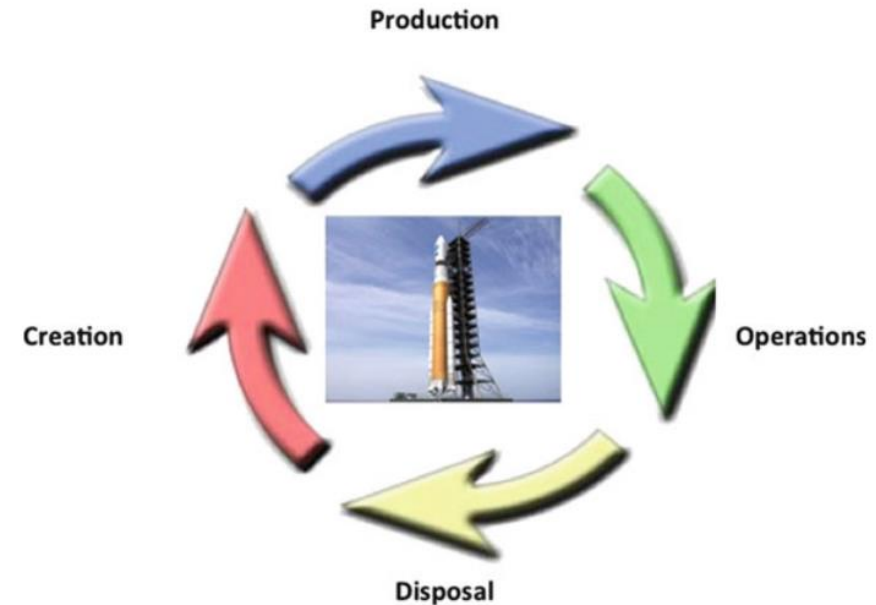


# デジタルツイン

- Michael Grieves が2002頃に提唱した概念
- Product Lifecycle Management (PLM) という文脈で提案された
- いかにより製品を設計し、生産し、改善し、生み出し続けるか？

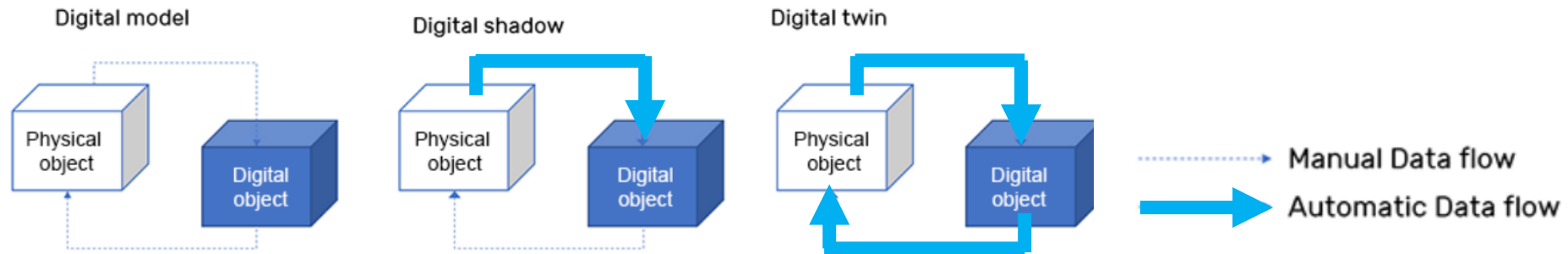
定義：

The Digital Twin is a set of virtual information constructs that fully describes a potential or actual physical manufactured product from the micro atomic level to the macro geometrical level.

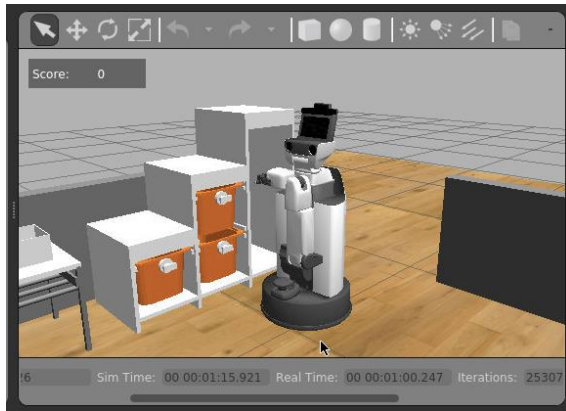


# デジタルツインのレベル

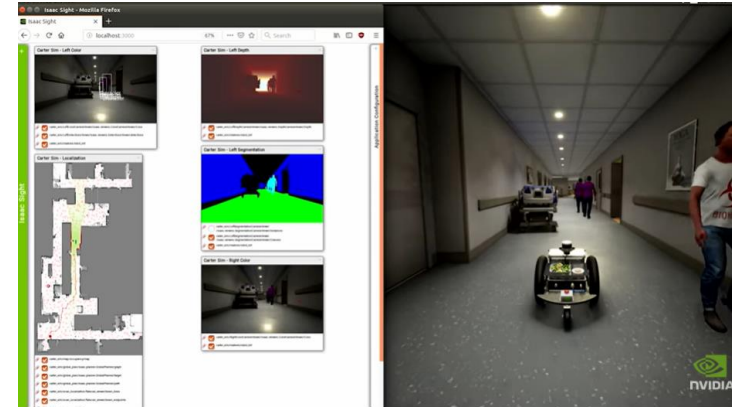
- Digital Model: 現実世界と切り離された情報空間  
 Digital Shadow: 現実世界をリアルタイムに反映した情報空間  
 Digital Twin: 現実世界にリアルタイムにフィードバックを及ぼす情報空間



# ロボットシミュレータ≒Digital Twin



HSRシミュレータ



Issac Sim -> Omniverse

**課題点：人間の存在・活動**



Habitat-sim





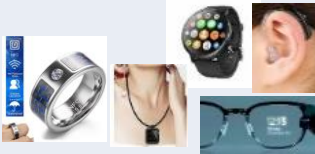




AI2THOR

# デジタルツインとHRI

(Human-Robot Interaction)

人もロボットも同時に考慮しているDigital Twin空間は存在していない  
(オフラインのDigital Modelが, 現状での限界)

	Robot (object) Only	Human only	Human + Robot
<b>Digital Model</b> 現実とは別世界	Offline Simulator 	Digital Human 	Offline Simulator 
<b>Digital Shadow</b> フィードバックは手動 or オフライン	Simulator + IoT 	Metaverse/Lifelog 	<b>今後の課題</b>
<b>Digital Twin</b> リアルタイムの フィードバック	Robot Controller 		

# 何が難しいのか？

- 人へのリアルタイムなフィードバックを与えること  
単なる情報のディスプレイではなく、経験／体験のフィードバック
- ロボットのデジタルツインと人のデジタルツインの統合  
デジタル化の対象が全く異なる

## 解決アプローチ

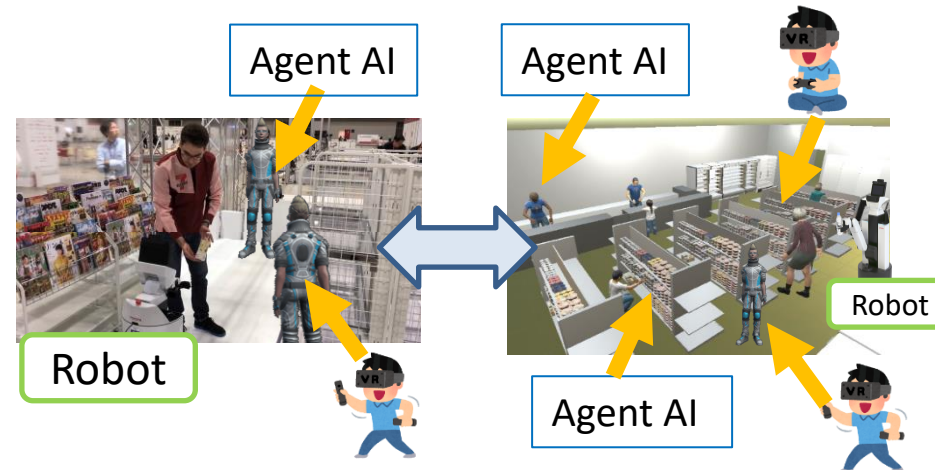
- 物のデジタルツインと人のデジタルツインを  
VRで結合する



# 解決アプローチ

## VR/ARによるデジタルツイン環境へのリアルタイム介入

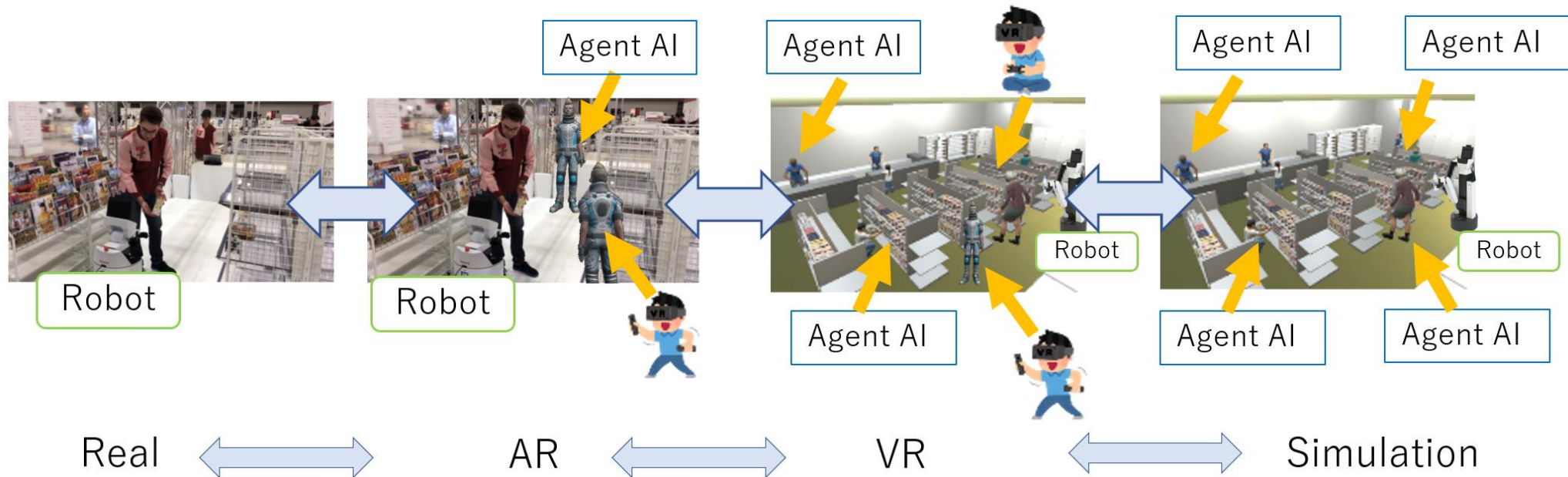
1. 現在のもの・ひと・ことの状態のリアルタイムでのサイバー空間への反映
2. サイバー空間上でのリアルタイムな将来予測
3. 予測した結果に基づく実世界へのフィードバック
  - ロボットへのフィードバック：行動計画，行動制御
  - ユーザへのフィードバック：スキル向上，状況判断のアシスト
4. VR/ARデバイスを介したユーザのサイバー空間への介入
  - サイバー空間での仮想経験
  - 任意の時空間でのロボットへの指示・インタラクション





# VR/ARデジタルツイン環境のメリット

- データ収集時 : 実環境／仮想環境の垣根を越え, 人・ロボットの行動データ収集のコスト削減
- データ運用時 : 人の主観的評価／フィードバックによる行動データの洗練化
- 現場での運用時 : ロボットの行動の最適化のみならず, 効率的な人の行動を促す情報フィードバック

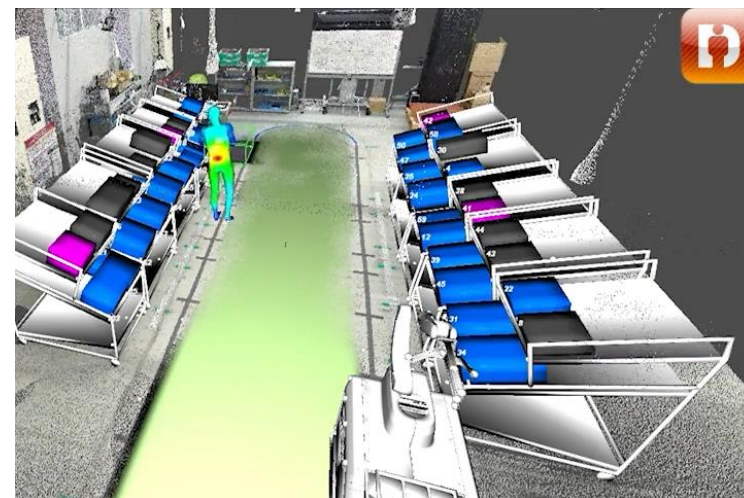


# 人を含めたデジタルツインの応用例

1. 生産ラインでの人とロボットの共同作業の効率化
2. 雑踏環境下での歩行者行動モデルとロボットの自律行動生成
3. VR+デジタルツインによる小売店舗環境のモデル化
4. コロナ禍へ対応：人とロボットの対話行動競技会のオンライン化

# 1. 生産ラインでの人とロボットの共同作業の効率化

- デジタルツインを活用した人・機械協調
  - 人・機械・作業進捗のデジタル化
  - 動的スケジューラを用いた作業計画
    - 身体負荷が低い作業（空箱の取り替え）を人（作業者）に割り当てる
    - 作業者にとって身体負荷が高いパーツのピッキングをロボットに割り当てる
- より良い作業計画の実現
  - 実験に基づく身体負荷・作業時間予測モデル構築
  - 予測モデルによる行動生成 → 学習データ拡張



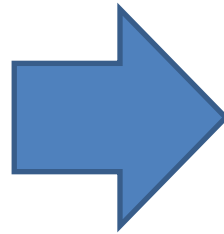
## 2. 雑踏環境下での歩行者行動モデルとロボットの自律行動生成

- サイバー空間での歩行者とのすれ違い動作学習
- ロボットに反応する人の動きをモデル化したい  
⇒ サイバー空間に人の動きを再現し, ロボット動作学習

実観測データから行動種類/  
出現確率/出現範囲を導出



動作学習用サイバー空間に  
ロボットに反応する人動作再現



日本科学未来館

強化学習によるすれ違い動作生成



# 3. VR+デジタルツインによる小売店舗環境のモデル化



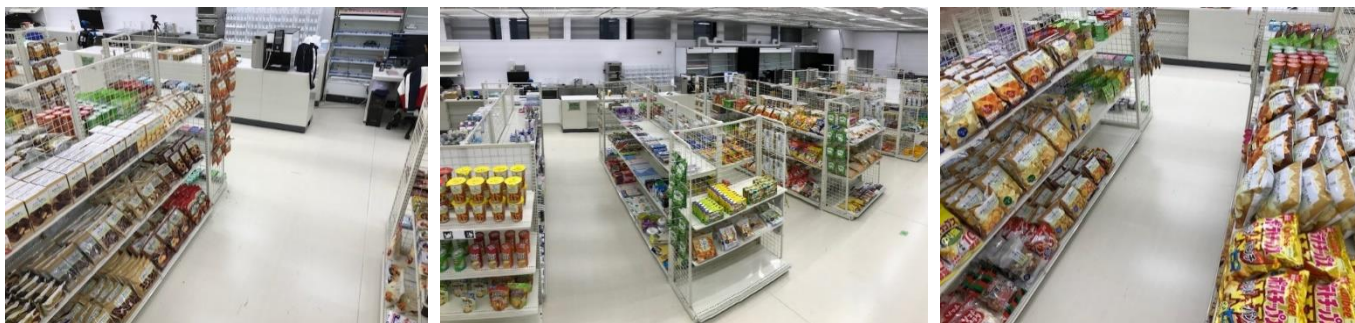
## デジタルツインの対象

- ・顧客の行動とロボットのサービス行動
- ・店員とロボットの共同作業

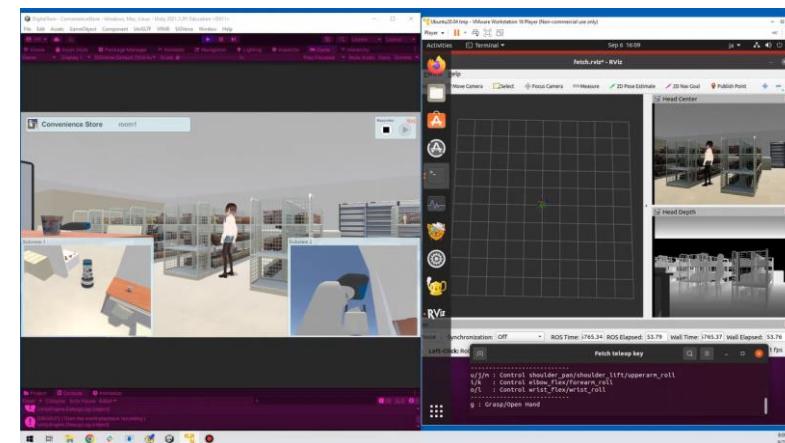
## VRの位置づけ

- ・仮想店舗での顧客行動データ収集の効率化
- ・店員に対する行動フィードバック（研修への応用）

## 実際の模擬店舗の様子



## デジタルツイン環境



## デジタルツインによる将来予測に基づく店員とロボットの協働効率化へ

# 4. 人とロボットの対話行動競技会のオンライン化

- 人とロボットの対話実験をクラウド上のVR空間で実施するプラットフォーム
- コロナ禍で実施不可能となったロボット競技会（RoboCup@Home）を完全オンラインで実施
- 被験者はVRデバイスを介してシミュレータ上のロボットと対話し共同作業する



IROS2022 でのCompetitionの様子。来場できない参加者もオンラインで競技に参加可能となった



T.Inamura et al. "VR Platform Enabling Crowdsourcing of Embodied HRI Experiments – Case Study of Online Robot Competition." Advanced Robotics, 35(11), pp.697-703, 2021.

Y.Mizuchi et al. "Evaluation of an Online Human-Robot Interaction Competition Platform Based on Virtual Reality," Advanced Robotics, 2023.

# まとめ

- 人とロボットの共進化を支える機械学習基盤  
（ワールドモデル）には人の行動データが不足している
- 実世界で人とロボットが協働する状況のデータの収集に  
人を含めたデジタルツインが重要となる
- VR/ARとデジタルツインを融合させた環境が  
人とロボット双方の行動の共進化を促す