

# 人とロボットの経験を拡張する デジタルツイン

国立情報学研究所  
総合研究大学院大学

稲邑 哲也



国立情報学研究所  
National Institute of Informatics



<http://researchmap.jp/inamura>

inamura@nii.ac.jp

# 人と経験を共有し 人をサポートする パーソナルロボット



ロボットの行動（経験）の向上だけが目標ではない  
人の行動（経験）の向上が、むしろ重要な目標となる

# 最終ゴールに向けた方法論

## VRデジタルツイン

1. ロボットが経験を効率的に積み、ユーザに適応した立ち振る舞いを素早く獲得するための場の構築
2. ロボットによる物理的支援だけでなく、映像、音声、言語等の情報を適切に呈示する認知的支援の場の構築



# 本日の話題の構成

1. デジタルツインの現状と限界点

2. 人とロボットのためのデジタルツイン

3. 人の行動変容を促すVRデジタルツイン

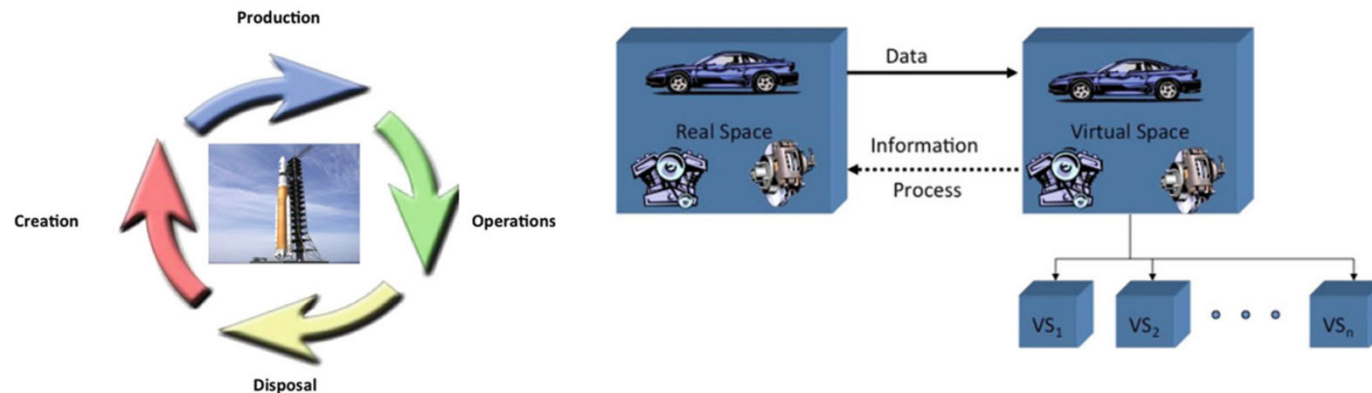
# デジタルツイン

Michael Grieves が2002頃に提唱した概念

いかに製品を設計し、生産し、改善し、生み出し続けるか？

Grieves の定義：

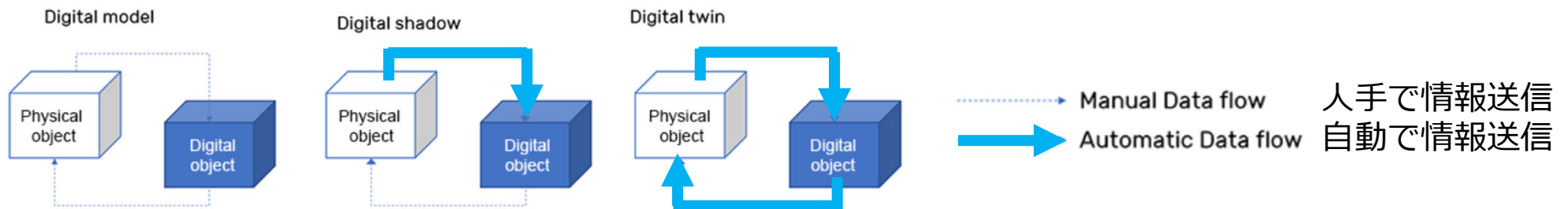
物理的な工業製品を原子のミクロなレベルから全体形状のマクロなレベルまで含めて表現可能な仮想的な情報空間のことをデジタルツインと呼ぶ



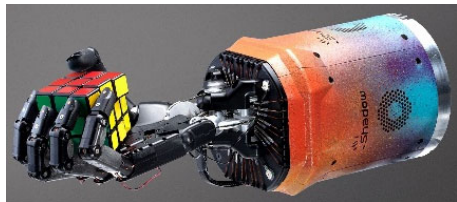
Grieves, M., and J. Vickers. 2017. "Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems." Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems.

# 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介入を及ぼす情報空間



# デジタルツインの現状(物系)

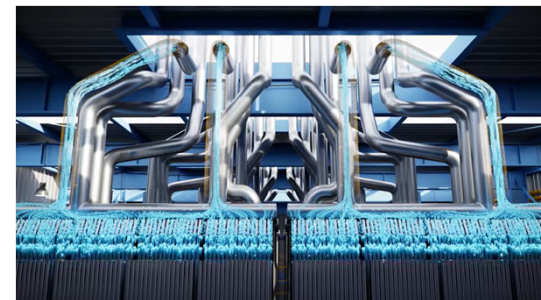


<https://www.youtube.com/watch?v=kVmp0uGtShk>



<https://www.youtube.com/watch?v=iaF43Ze1oeI&t=11s>

Digital Shadow / Digital Twin



NVIDIA Omniverse

Digital Model



NVIDIA DRIVE Sim

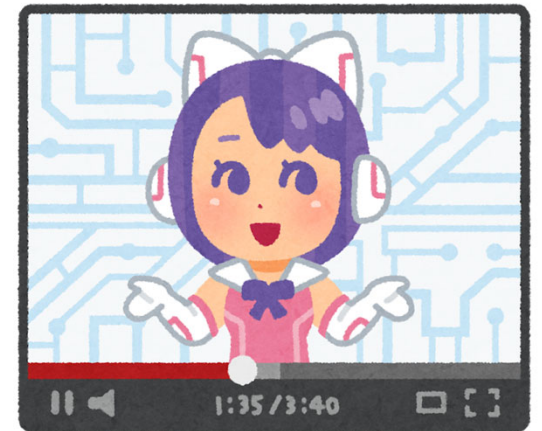
Digital Twin



<https://info.tokyo-digitaltwin.metro.tokyo.lg.jp/>

Digital Model

# ひとのデジタルツイン?



メタバースと人のデジタルツインは異なる



# デジタルツインの現状（人系）

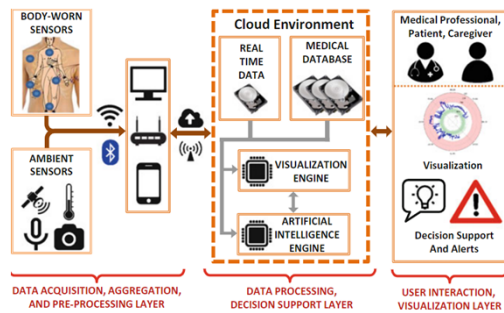


<https://www.youtube.com/watch?v=LNfGKRjNQKw&t=327s>

Digital Shadow



Digital Shadow



[https://doi.org/10.1007/978-3-030-27844-1\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-27844-1_8)

Digital Shadow



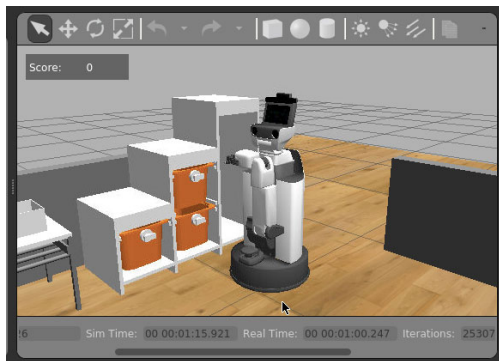
Digital Human  
(DhaibaWorks)



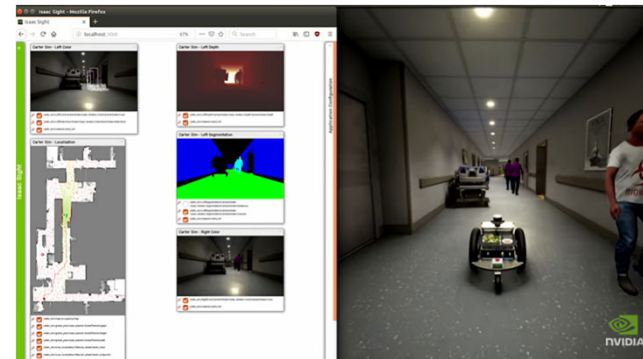
NVIDIA Omniverse

Digital Shadow

# 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





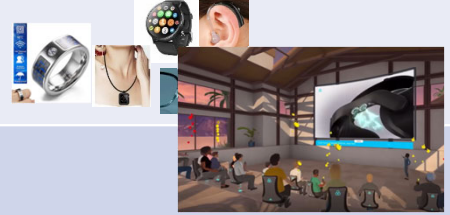



AI2THOR

# 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デジタルツイン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
Digital Model	Offline Simulator 	Digital Human 	Offline Simulator 
Digital Shadow	Simulator + IoT 	Metaverse/Lifelog 	<b>今後の課題</b>
Digital Twin	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

# ここまでのまとめ

- デジタルツインとは、現実を反映したデジタル空間を活用して、現実を改善するシステム
- デジタルツインは現状「物のデジタルツイン」が主流
- 今後「人のデジタルツイン」が発展していく
- 人へのリアルタイムフィードバックにはVRが必須

# 本日の話題の構成

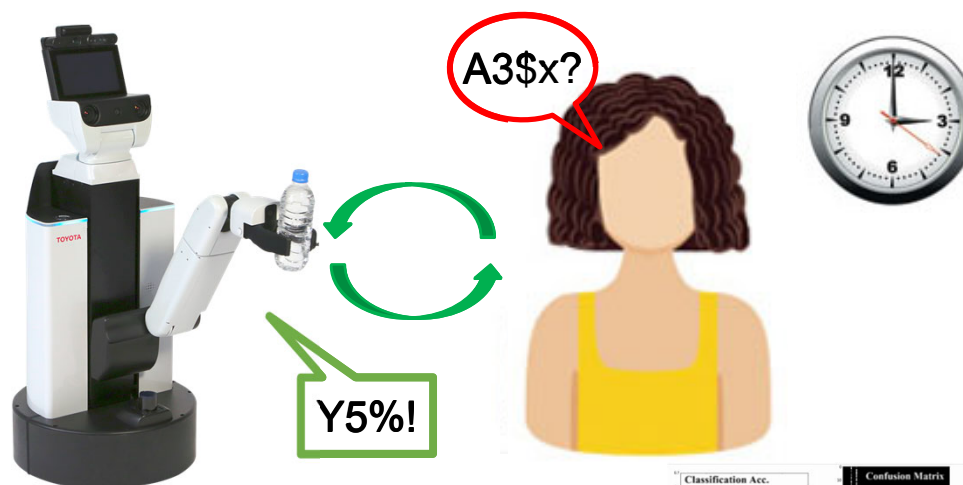
1. デジタルツインの現状と限界点

2. 人とロボットのためのデジタルツイン

3. 人の行動変容を促すVRデジタルツイン

# HRI研究におけるボトルネック

- ロボットのメンテナンス／被験者の膨大なコスト
- 研究室やプロジェクト内でデータが閉じる傾向が高い



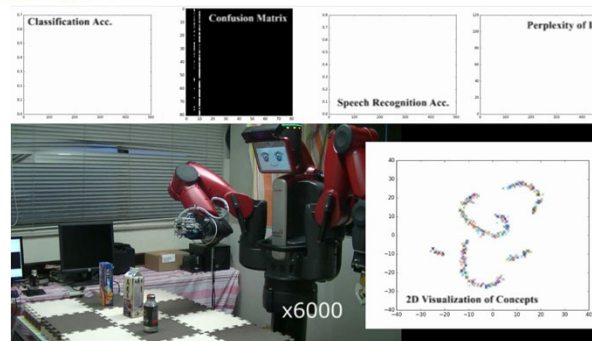
ATR: Robovie

<https://botscene.net/2013/02/11/robovie-goes-to-school/>



Osaka Univ.: CB2

T. Minato, Y. Yoshikawa, T. Noda, Shuhei Ikemoto, H. Ishiguro, and M. Asada, "CB2: A child robot with biomimetic body for cognitive developmental robotics," Int'l Conf. on Humanoid Robots, 2007, pp. 557–562.



T. Nakamura, T. Araki, T. Nagai, and N. Iwahashi, "Grounding of Word Meanings in Latent Dirichlet Allocation-Based Multimodal Concepts," Adv. Robot., vol. 25, no. 17, pp. 2189–2206, Jan. 2011.

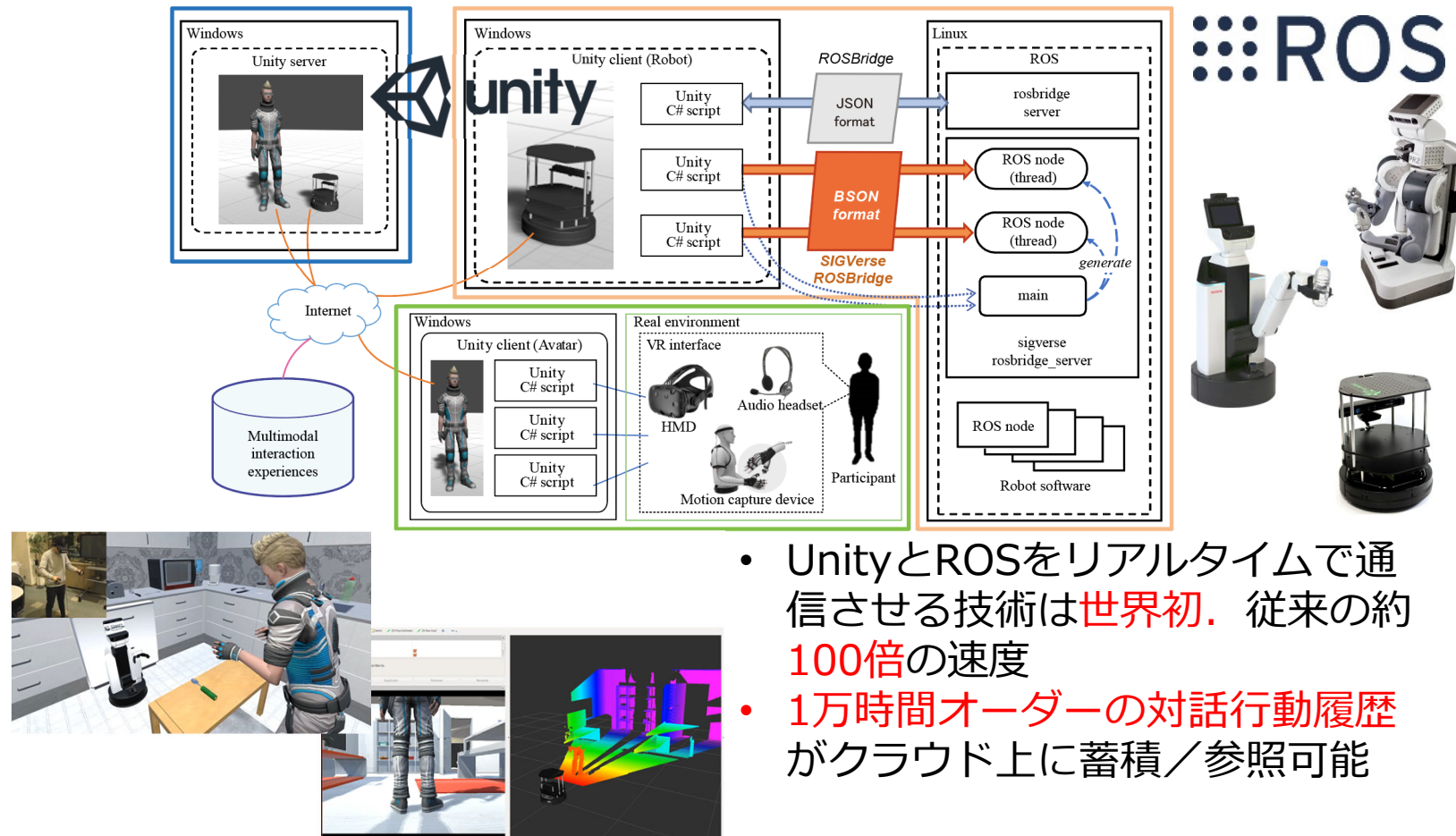
# 人とロボットの経験を拡張させるプラットフォーム: SIGVerse



SIGVerse: A cloud-based VR platform for research on multimodal human-robot interaction.  
T. Inamura & Y. Mizuchi: Frontiers in Robotics and AI, 2021.



# SIGVerseプラットフォーム ROSとUnityの融合 + 行動データベース



- UnityとROSをリアルタイムで通信させる技術は**世界初**。従来の約**100倍**の速度
- **1万時間オーダー**の対話行動履歴がクラウド上に蓄積／参照可能

SIGVerse: A cloud-based VR platform for research on multimodal human-robot interaction.

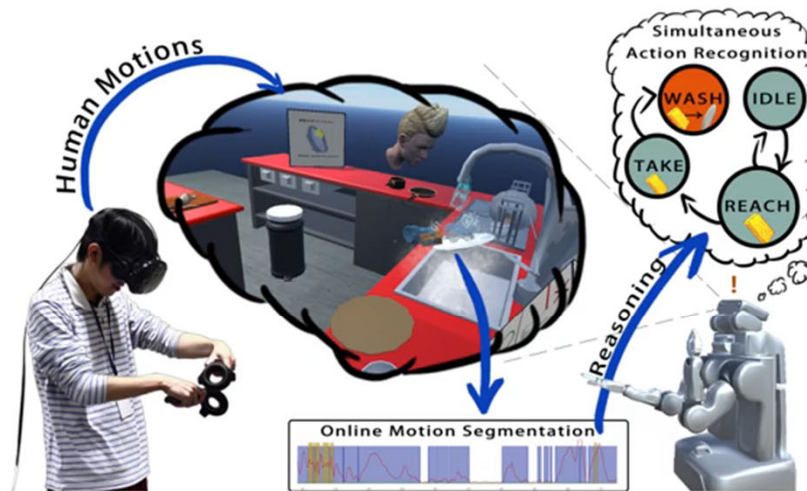
**T. Inamura** & Y.Mizuchi: Frontiers in Robotics and AI, 2021.

Cloud-based Multimodal Human-Robot Interaction Simulator Utilizing ROS and Unity Frameworks

Y.Mizuchi and **T.Inamura**, Int'l Symp. on System Integration, pp.948-955, 2017

# On-Line Simultaneous Learning and Recognition of Everyday Activities from Virtual Reality Performances

Tamas, Bates, Karinne Ramirez-Amaro, Tetsunari Inamura,  
and Gordon Cheng



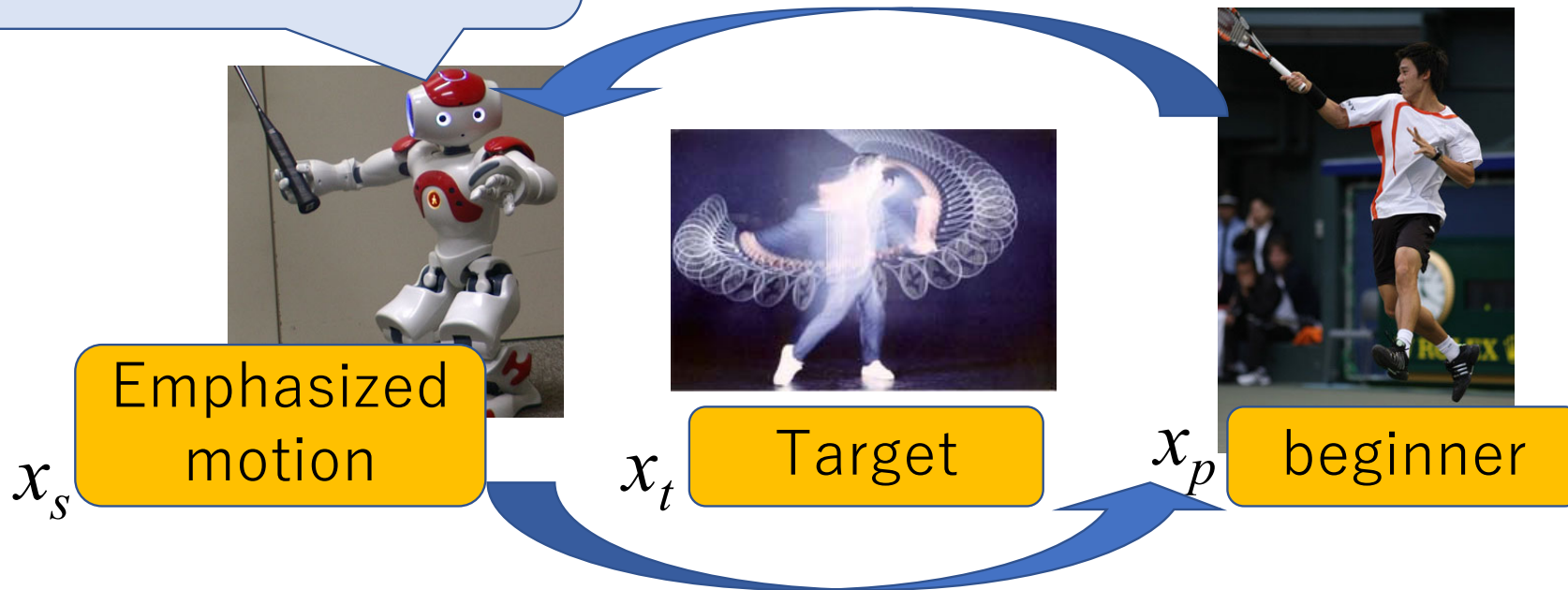
<https://youtu.be/feF13VZ-rew>

On-Line Simultaneous Learning and Recognition of Everyday Activities from Virtual Reality Performances  
T.Bates, K.R.Amaro, T.Inamura and G.Cheng, Proc. of Int'l Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.3510-3515, 2017

# 人へのリアルタイムな フィードバック介入の例

# スポーツコーチングへの応用

そんなジャンプしたらダメですよ. こういう具合にしてください



どのような強調動作と声かけをすると, 初心者の動作学習が効率化するか?

# スポーツコーチングへの応用

初心者の運動と理想の運動の差分を強調する

① お手本が再生される



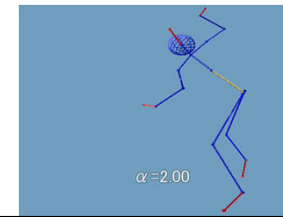
② 手本を見て実演



③ 動作計測して差分計算

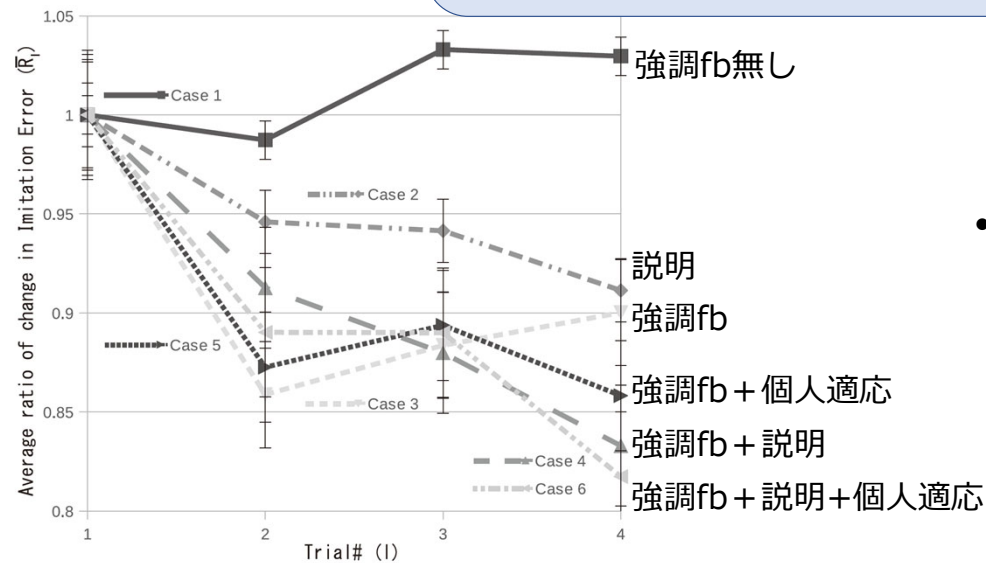


④ 差分を強調して再度提示



“もっとこういう具合にして下さい”

$$X_S = X_p + \alpha (X_t - X_p)$$



- 差分の強調, 言語的説明強調係数の個人適応の統合によって, 通常条件よりも速く運動を習得可能となった

# ロボットから人へのコミュニケーション

- 既存のロボットは、人から与えられた指示に従ってタスクを実行する能力が注目されていた
- ロボットから人間に対するコミュニケーションも重要



ロボットが人間に指示を与える (例: 人に助けを依頼, 協調作業など)

# ロボット競技会での活用



Best of RoboCup@Home  
[<http://www.youtube.com/watch?v=-oGeU-58wrQ>]

# RoboCup@Homeのメリット／デメリット

- 日常生活空間（非実験室）＋実際の人間という複雑で予期できない環境での行動が求められる
  - 評価に時間がかかり、「一発勝負」になりやすい
- 人間のジェスチャーや、発話に含まれる言いよどみ、会場の照明条件など、常に揺れ動く条件
  - 統計的で公平性のある審査が難しい
- 客観的評価のため、人物認識・音声認識・物体認識・把持行動の可否などに集中しやすい
  - 対話行動の効率や親切さなどの主観的な評価が困難

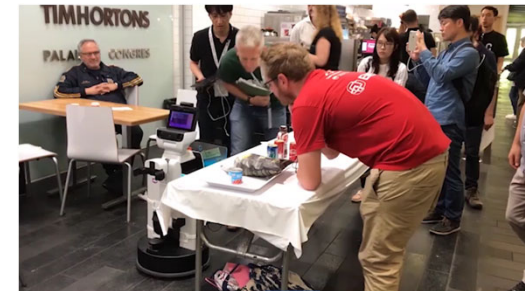


# 新しいロボット競技会への応用



- 実機ロボットでの人間との対話性能評価は時間・人的コストが莫大
- ゆえに「一発勝負」化の傾向

→ VR/シミュレーション化



T.Inamura, J.T.C.Tan, K.Sugiura, T.Nagai and H.Okada: "Development of RoboCup@Home Simulation towards Long-term Large Scale HRI," LNCS: RoboCup 2013: Robot World Cup XVII, Vol.8371,pp.672-680,2013.

What competitions were conducted in the Service Categories of the World Robot Summit?  
H. Okada, K. Wada, T. Inamura, Advanced Robotics, 33(17), pp.900-910, 2019

# 人が介入するVR空間での競技の意義

## Handyman



- 曖昧性のある発話内容の文脈を介した理解
- 人間が間違っただけの指示を与える場合もある
- その間違いの指摘がタスク達成の条件

## Interactive Cleanup

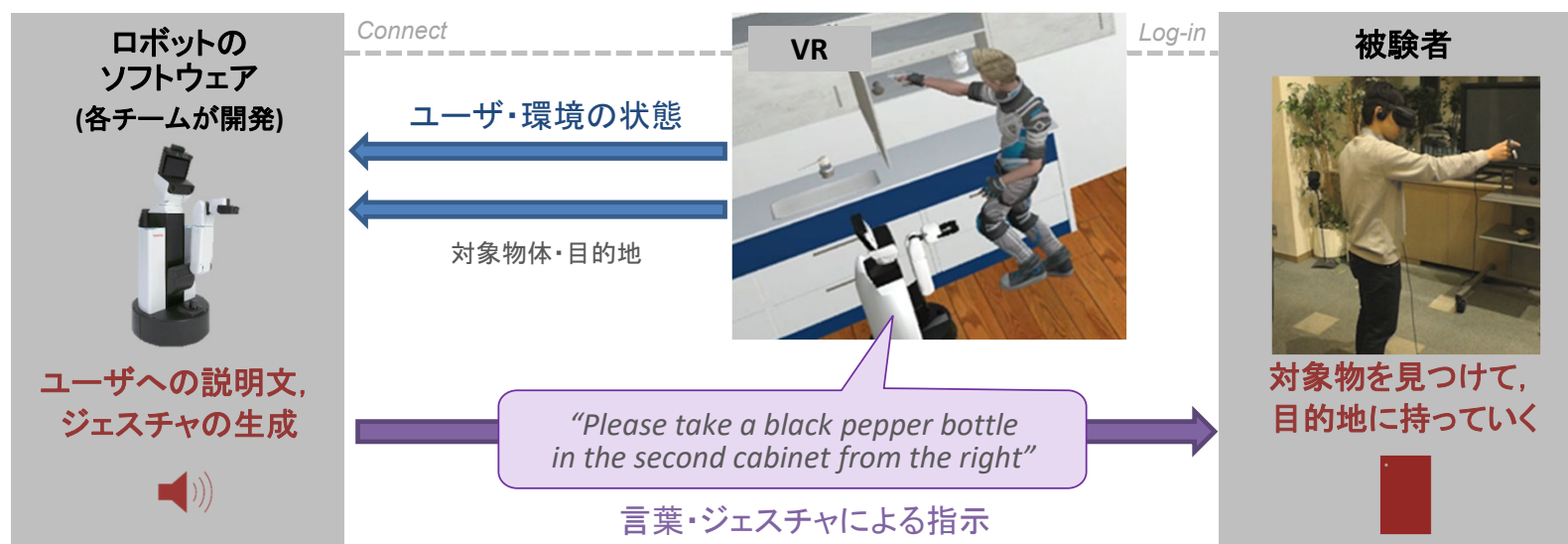


- ユーザは歩きながらジェスチャーと言語で行動を指示
- 実際の人間のジェスチャーおよび歩行動作がVR上で再現される

- 実機ロボットでは時空間的制約で実現が困難な多様な環境での実験・評価
  - VR環境: 30種類以上の部屋, 170個以上の日常生活品, 5時間を超える時間をかけて評価
  - 実環境: 1種類の部屋, 30個程度の日常生活品, 30分程度での評価
- チーム間で, 人の動作, リアクションに変動が無い
- 公平性と統計的信頼性が担保された評価の実現

# 競技タスク：Human Navigation

日常生活での行動を人間に説明する能力を競うタスク



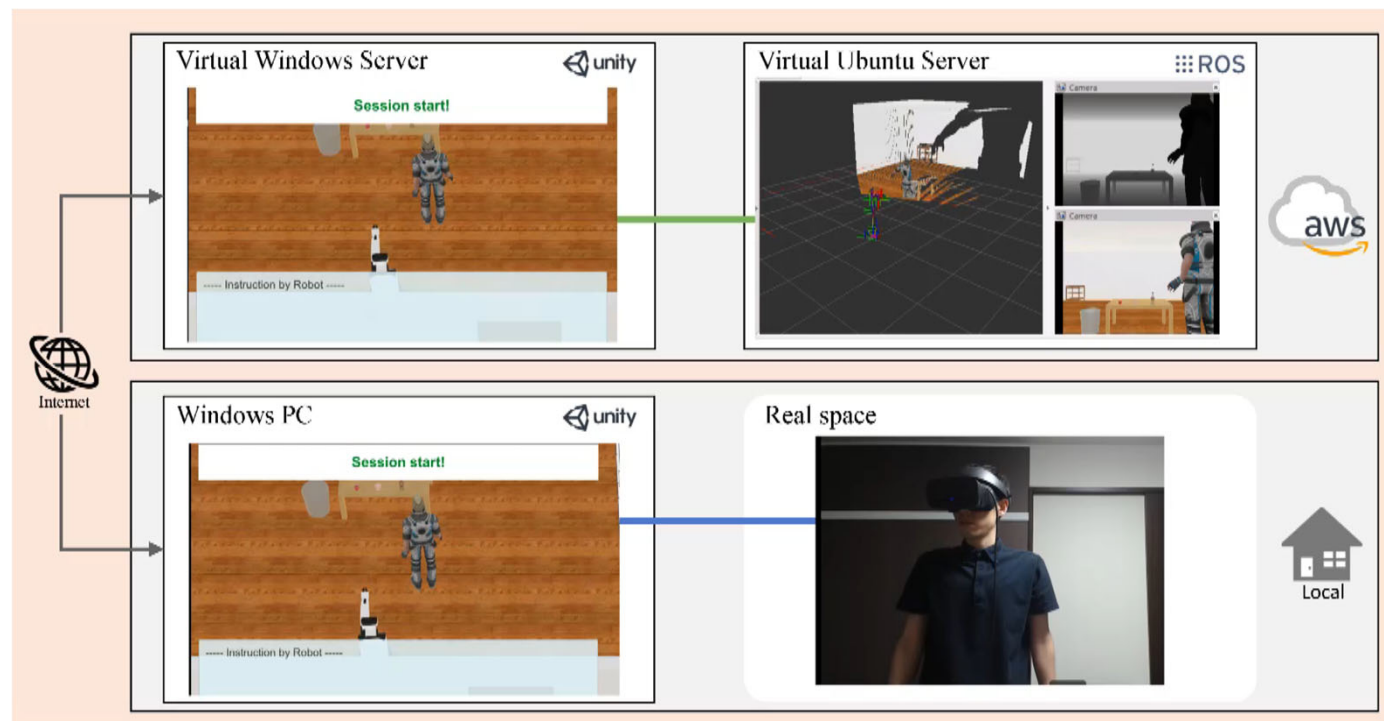
環境や指示を受ける人間の主観によって結果が異なる

→ 様々な環境・ユーザを対象に複数回実行し, 統計的に評価



# コロナ禍におけるロボットとの対話実験環境

## 人間がクラウド型VR空間で仮想ロボットと対話 AWSとの連携による実装



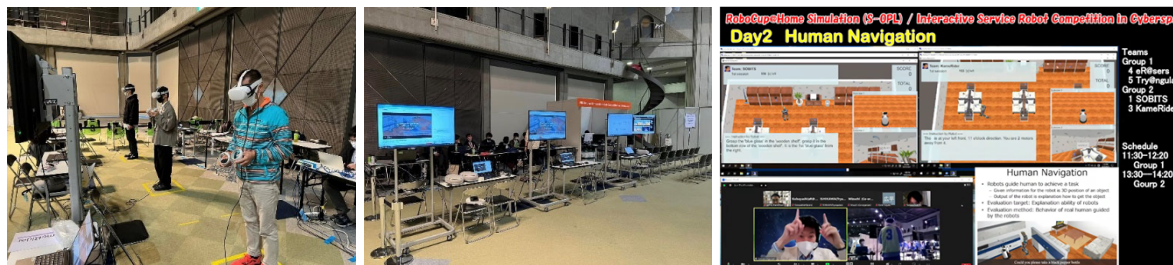
T.Inamura et al. VR Platform enabling Crowdsourcing of Embodied HRI Experiments – Case Study of Online Robot Competition  
Advanced Robotics, Vol35, No.11, pp.697-703, 2021

# 人とロボットの対話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



ロボットの国際会議で競技の様子。来日できない参加者もオンラインで参加可能となった



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.

# ロボット競技会で収集した データの活用

# 人間とロボットの対話の評価

- 評価基準が明確でない（＝主観的な評価）
- 生成された文章だけでは「親切さ」の評価が困難
- 発話のタイミング，表現の仕方，人間の行動・状況に応じた発言など，様々な情報を統合的にチェックする必要がある

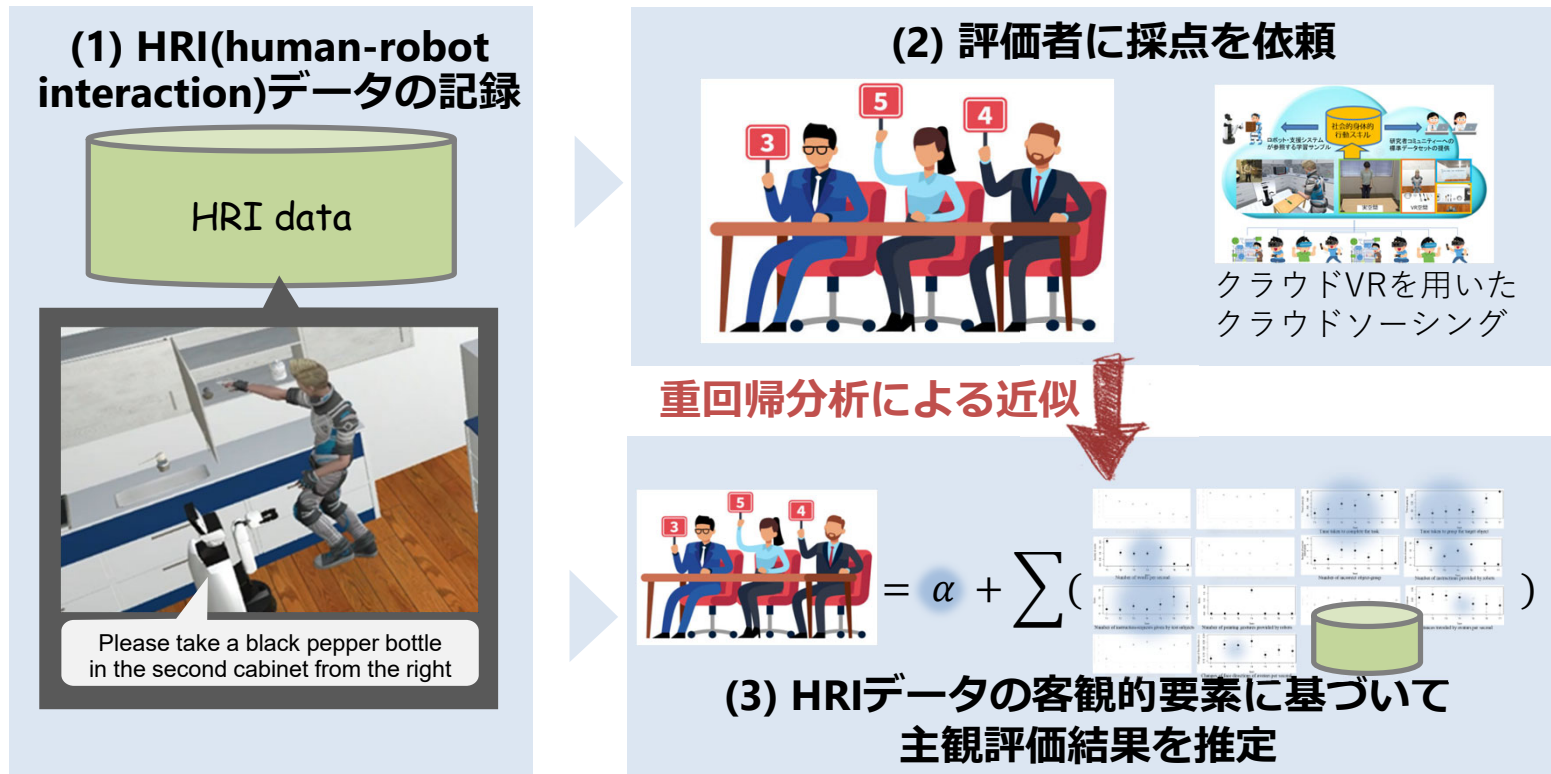


誰がどのように評価基準を定めるべきなのか？

→ データドリブンによる人間の主観評価法の近似

“Competition design to evaluate cognitive functions in human-robot interaction based on immersive VR” T. Inamura et al, RoboCup Symposium 2017.

# 知能ロボットとの対話行動の評価方法の確立



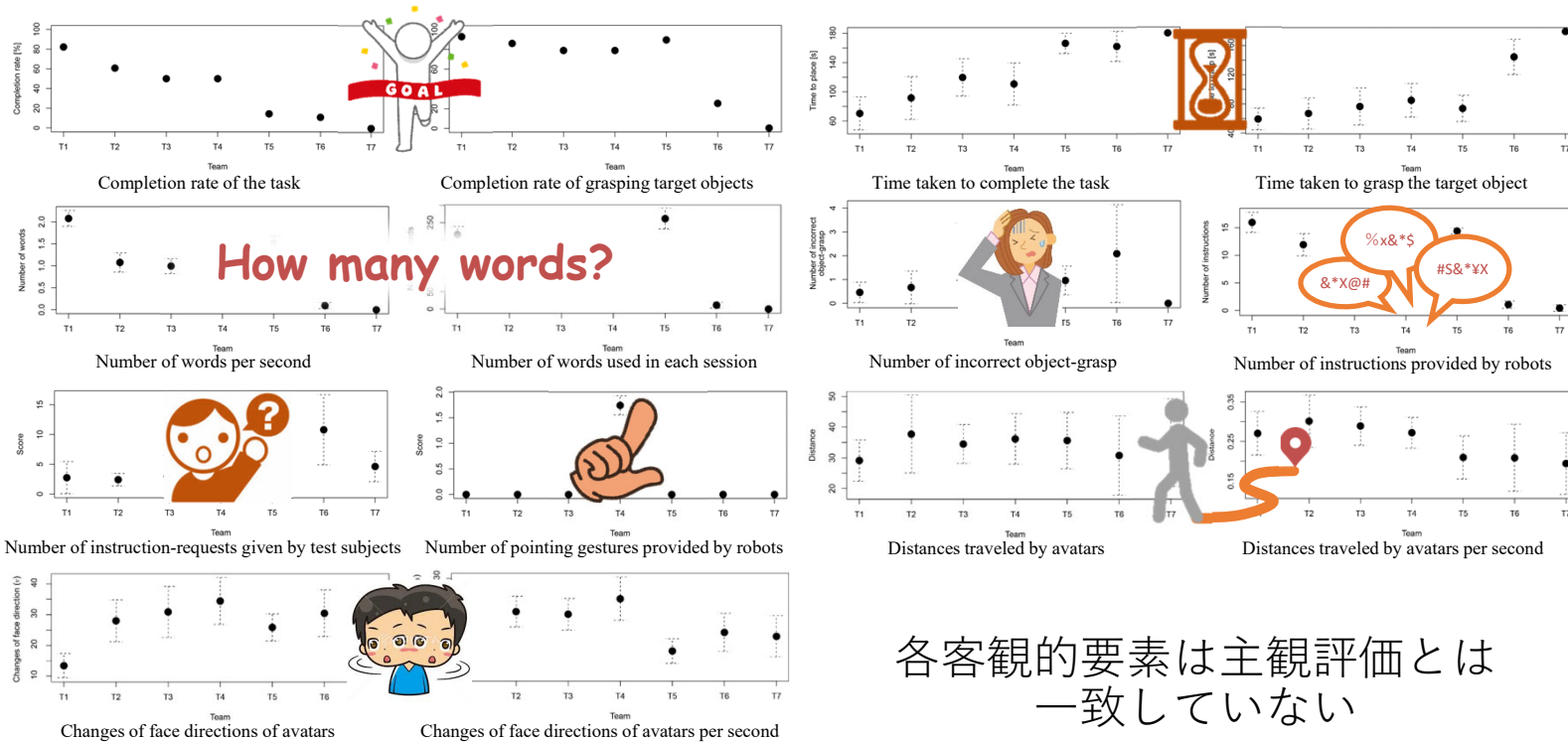
- 主観的評価に依存していた対話行動のコンペティションの改善
- 人間が説明できない評価基準の根拠をシステムが抽出し、客観的な評価法を確立  
→ ロボットの対話行動の自律学習の道を拓いた

Y. Mizuchi and T. Inamura: "Optimization of criterion for objective evaluation of HRI performance that approximates subjective evaluation: A case study in robot competition," Advanced Robotics, Vol.34, No.3-4, pp.142-156, 2020.



# 観測データから得られた客観的要素

HRI data



各客観的要素は主観評価とは一致していない

# 客観的要素に基づく主観評価の推定

$r_{t,s}$ : 推定された主観評価結果 (目的変数)

$\alpha$ : 切片の値

$i$ : 説明変数のIndex

$t$ : チームのIndex

$s$ : 試行のIndex

$\beta_i$ : 各客観的要素の重み

$x_{t,s,i}$ : 各客観的要素の値

$$r_{t,s} = \alpha + \sum_{i=1}^n \beta_i \cdot x_{t,s,i}$$

線形重回帰分析

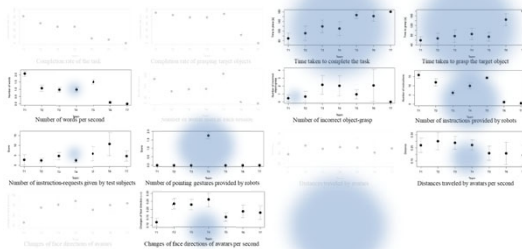
偏回帰係数

Coefficient	Value	
$\alpha$	3.9058	***
$\beta_{time\_task\_comp}$	-0.0145	***
$\beta_{time\_grasp}$	-0.0022	***
$\beta_{num\_incorr\_grasp}$	-0.0017	
$\beta_{num\_inst}$	0.0207	**
$\beta_{num\_word\_sec}$	0.0266	
$\beta_{num\_request}$	-0.0026	
$\beta_{num\_gesture}$	0.1071	**
$\beta_{dist\_per\_sec}$	0.2882	.
$\beta_{face\_dir\_per\_sec}$	0.4470	.
$\beta_{any\_inst}$ (dummy variable)	0.8518	***

Significance codes: \*\*\* p < 0:001,  
\*\* p < 0:01, \* p < 0:05, . p < 0:1



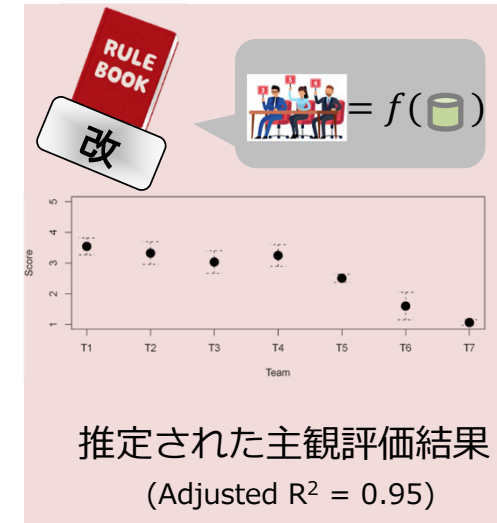
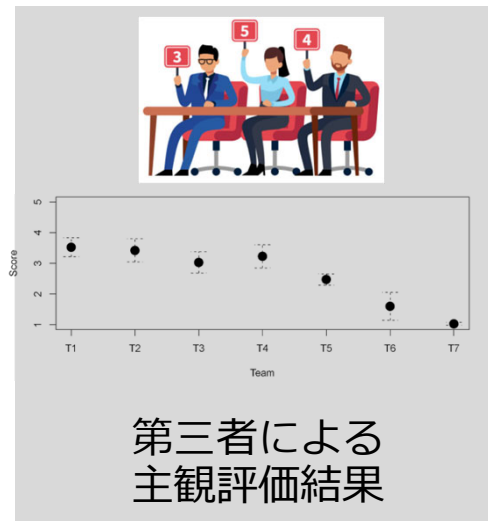
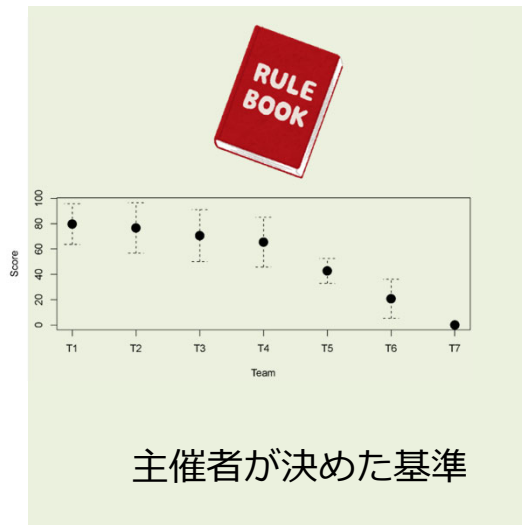
$$= \alpha + \sum ( \text{scatter plots} )$$



適切に説明変数を選択するために試行錯誤が必要

→VRを活用することで、評価尺度の決定/修正プロセスを実現

# 推定された主観評価結果



- 客観的評価尺度を適切に決定できた
- HRIの質の評価を自動化できる可能性が示された

# 人とロボットの 協調作業のためのVRデジタルツイン

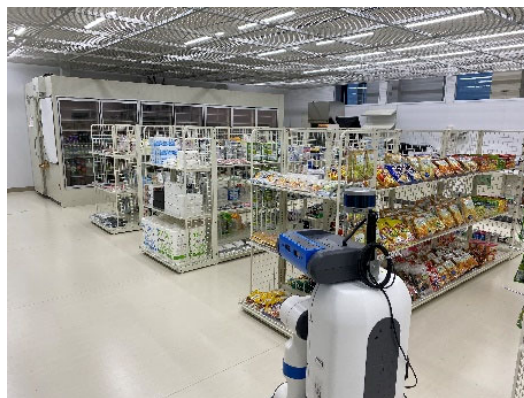
# 人と共に進化するAIシステムの基盤技術開発



[https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_101336.html](https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101336.html)

【狙い】 現実の世界を反映させたシミュレーションによる  
店舗での人とロボットの協働作業の最適化  
(接客サービス, 商品配置・運搬など)

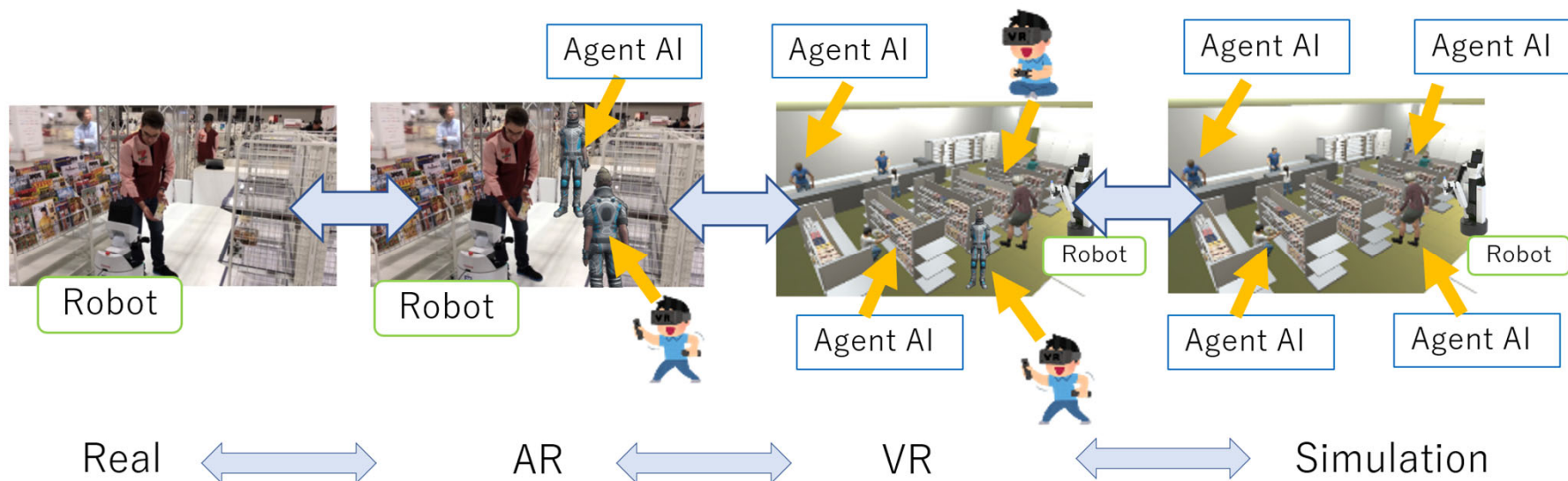
【アプローチ】  
人を含めた店舗のデジタルツイン化  
空間/もの/ひとの変化・対話の記録とモデル化  
将来シミュレーションに基づく人とロボットへの  
フィードバック



人とロボットの体験型デジタルツイン, 稲邑哲也, 日本ロボット学会誌 40(7) 2022年9月

# 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



### 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

# 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

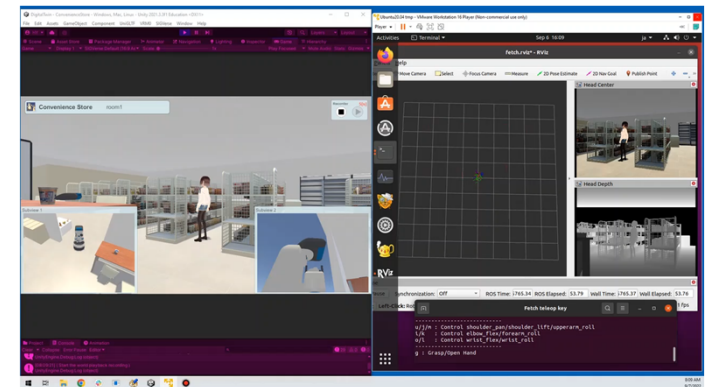
## VRの位置づけ

- ・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

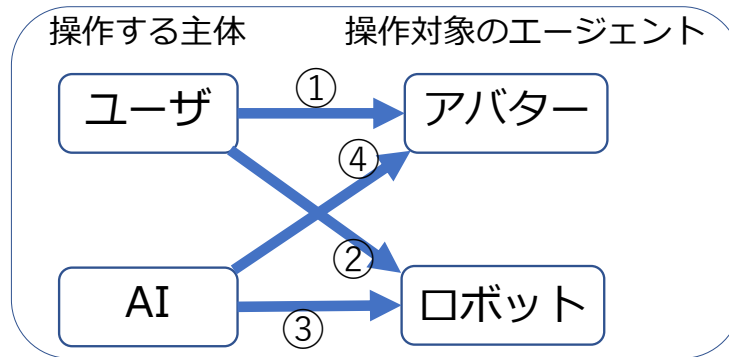
“Digital Twin of Experience for Human-Robot Collaboration through Virtual Reality,” Tetsunari Inamura, International Journal of Automation Technology, 17(3), 2023  
稲邑, “VR体験と実体験を統合し経験を拡張させるデジタルツイン環境の開発” 第22回 計測自動制御学会 SI部門講演会 2021

## デジタルツインへ介入する人とロボットのためのインタフェース

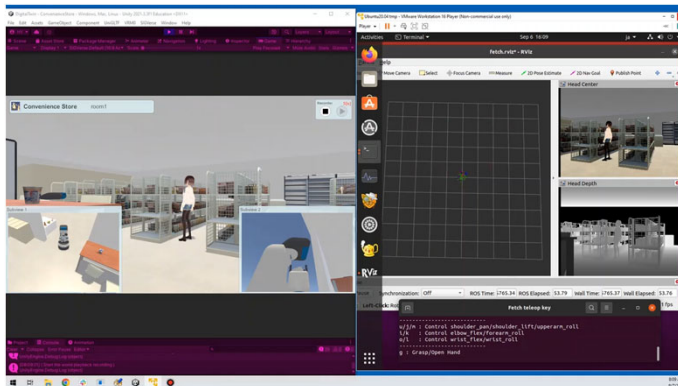
以下の4通りの操作機能の実装

1. ユーザがアバターを操作
2. ユーザがロボットを操作
3. AIソフトウェアがロボットを制御
4. AIソフトウェアがアバターを制御

全ての履歴が記録/再生可能



④: ソフトウェアがアバターを操作



②: ユーザがロボットを操作



①+④: ユーザとソフトウェアがアバターを操作



# ここまでのまとめ

- 人のデジタルツインと、ロボットのデジタルツインを結ぶ架け橋がVR（バーチャルリアリティ）
- ロボット競技会では、人とロボットの対話能力がメインの評価の対象である
- 現実空間での評価には限界がある→VRデジタルツイン
- 対話能力を向上させるための、人の主観をデジタルツインで抽出し、活用する
- 人の行動・スキルもデジタルツインで向上可能

# 本日の話題の構成

1. デジタルツインの現状と限界点
2. 人とロボットのためのデジタルツイン
3. 人の行動変容を促すVRデジタルツイン

人の行動変容をうながす  
VRデジタルツインに向けて

## ムーンショット目標3

2050年までに、AIとロボットの共進化により、自ら学習・行動し人と共生するロボットを実現

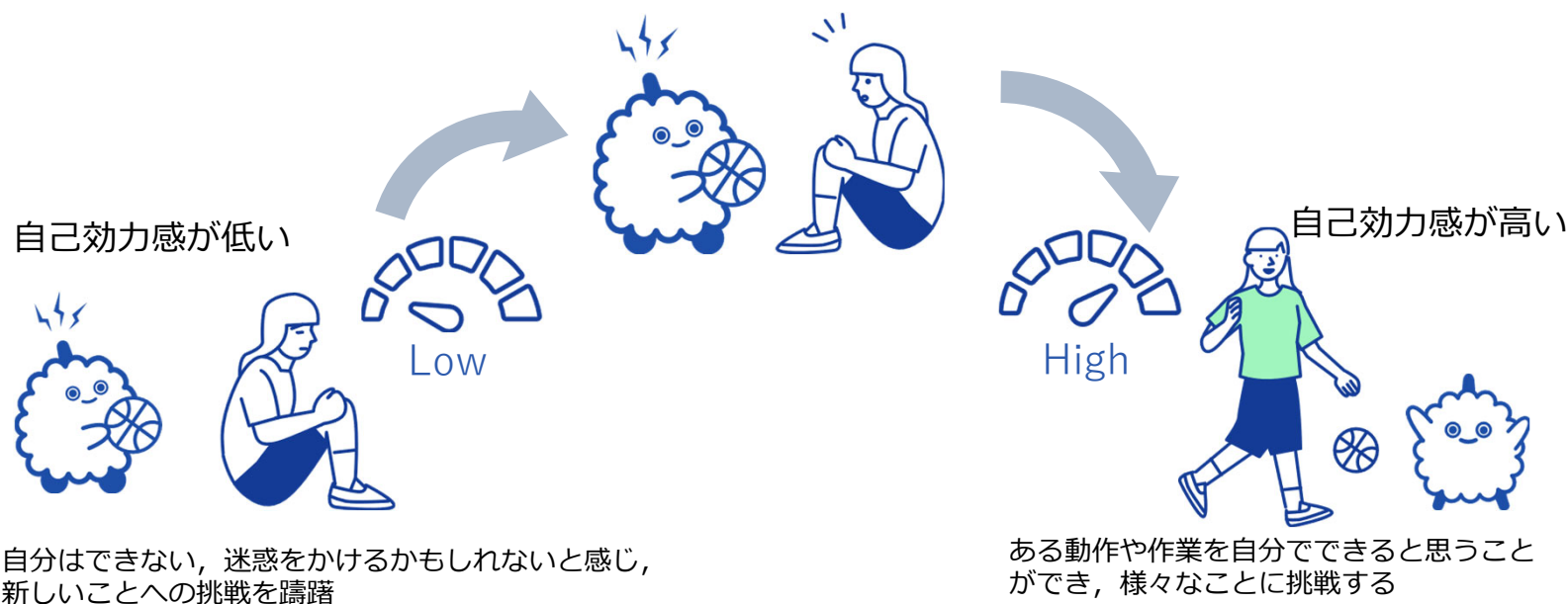


# 「活力ある社会を創る適応自在AIロボット群」

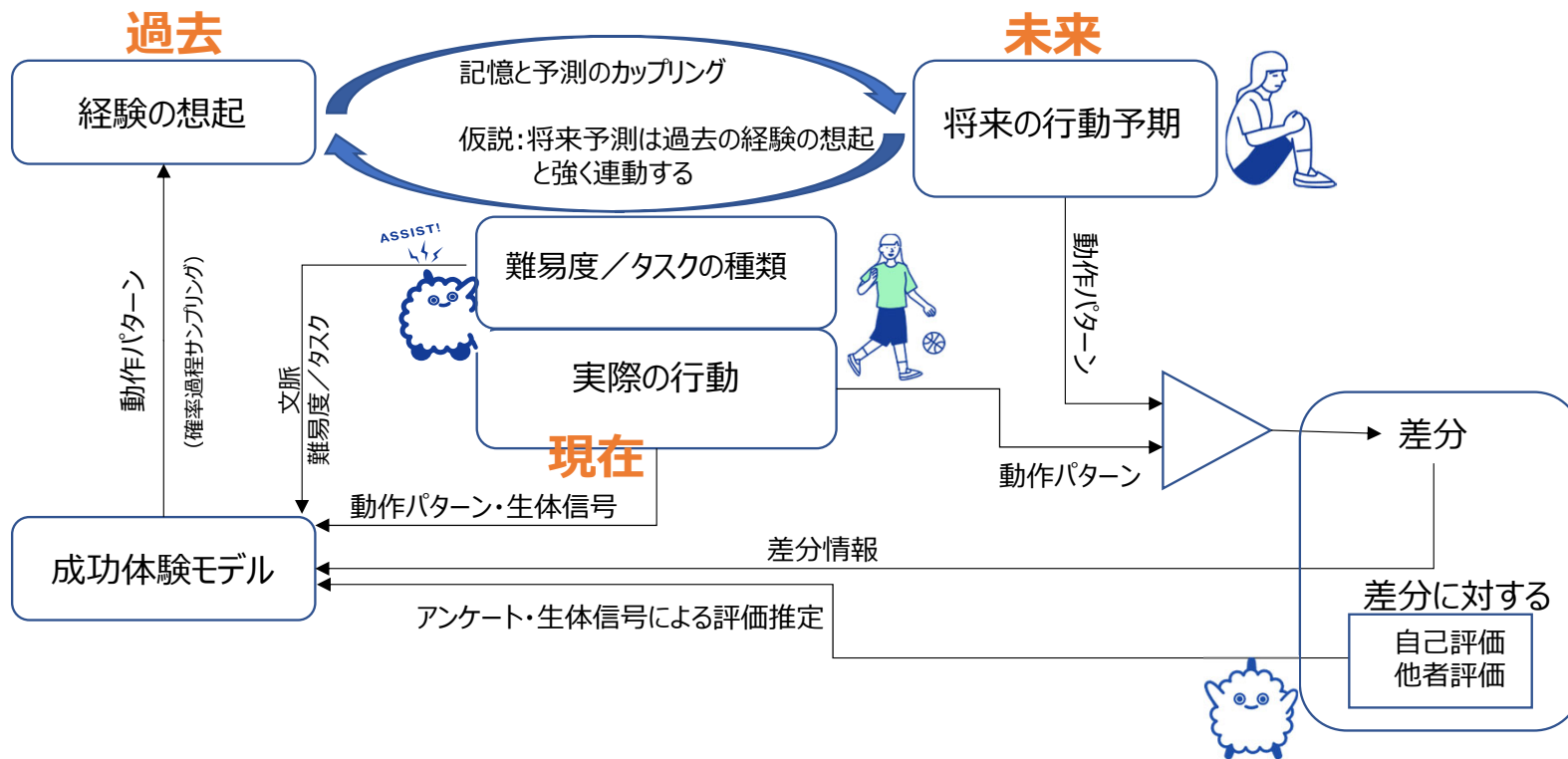
## 軸となるコンセプト:自己効力感

「ある結果を生み出すために必要な行動を、どの程度うまく行うことができるか」ということへの本人の**認知**※（自分の行動に対する可能性の認知）

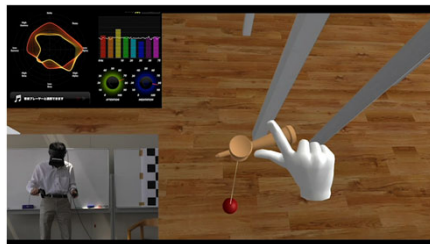
※情動や感情とは異なる



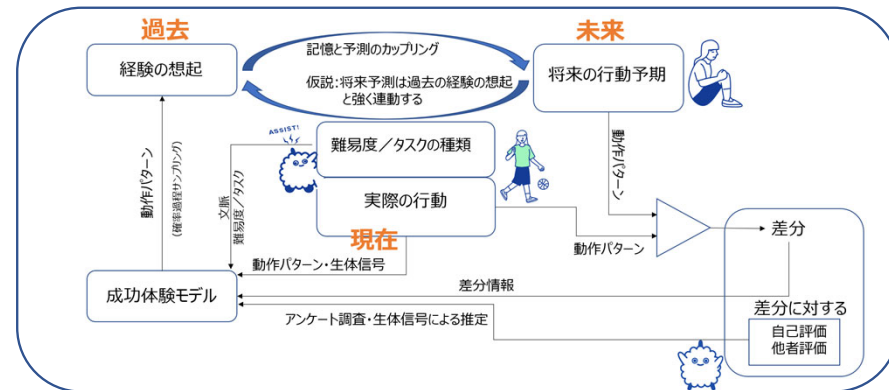
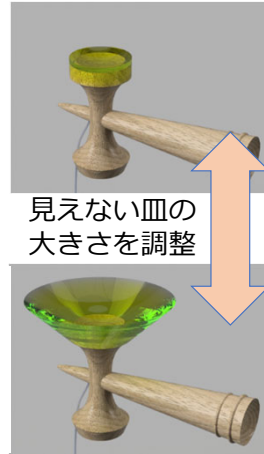
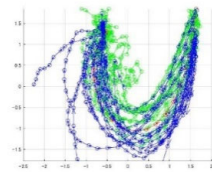
# 自己効力感を向上させる成功体験マネージャー



# VRを用いた成功体験マネージャー



成功体験モデルから生成された過去の記憶  
≒将来の予測



- 人のデジタルツイン
  - 経験の記憶モデル: けん玉操作・手の動作の履歴
  - GPDM; Gaussian Process Dynamics Model を用いた確率的モデリング
- VR を用いた擬似的な成功体験の創出
  - タスク難易度 (皿の大きさ) を調整して成功確率を制御
  - 自己効力感を向上させる成功体験のフィードバックを設計

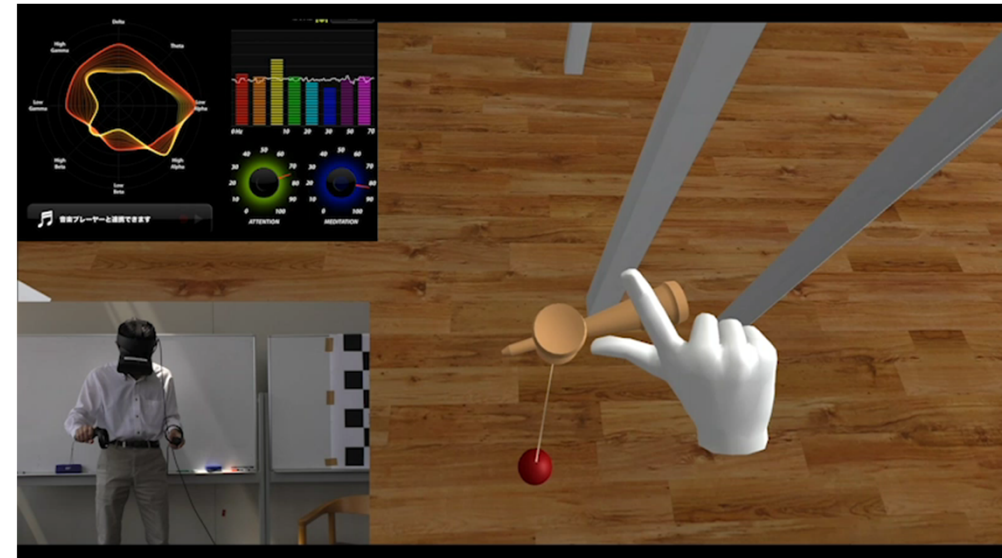
# VRけん玉における成功体験と自己効力感の関係

- 成功体験と自己効力感の関係の調査
- 運動主体感と自己効力感の関係の調査

- 以下の項目についてアンケート調査を行う

- 記憶の中での、自分がタスクを成功させた回数
- 運動主体感, 身体保有感の度合い (H. Ehrsson 2012に準拠)
- 自己効力感の度合い (GSES; 板野1986に準拠)
- 精神的負荷の度合い (NASA-TLX に準拠)

- H.Ehrsson et al.(2012): Moving a rubber hand that feels like your own: a dissociation of ownership and agency, *Frontiers in Human Neuroscience*, 2012
- GSES: 板野,東條, 一般性セルフエフィカシー尺度作成の試み,行動療法研究,1986
- NASA-TLX: <https://humansystems.arc.nasa.gov/groups/TLX/>



# 自己効力感との相関係数

パラメータ	相関係数	P-value
成功回数	0.661	0.037
失敗回数	-0.05	0.885
記憶での成功回数	0.678	0.031
運動主体感	0.805	0.005
身体保有感	-0.23	0.515
精神的負荷	-0.46	0.18
記憶の誤差	-0.47	0.175
モチベーション	-0.46	0.183
成功/失敗比率	0.585	0.075

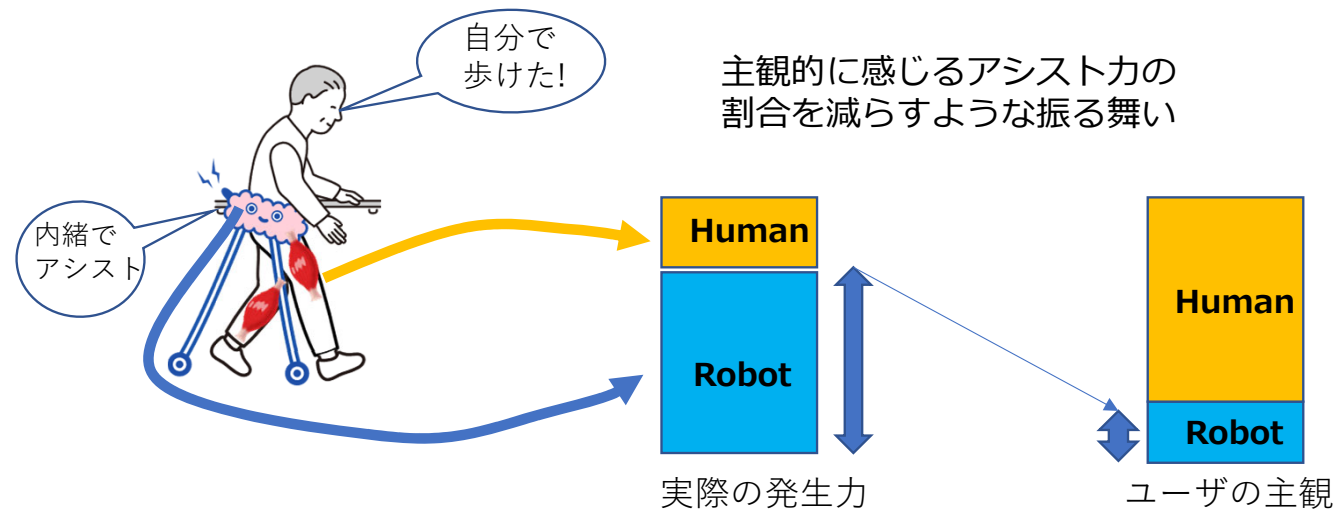
- 失敗回数は自己効力感とあまり相関していない
- 成功回数は自己効力感に中程度の相関
- 成功回数の予測値は実際の成功回数よりもやや相関が強い可能性あり

失敗を気にせず、成功体験を積み重ね、「自分は成功した」と想起できる状態を作り出すことが有効



# アシストし過ぎないアシストロボット

## 運動主体感のキープ



- AIロボットが主導権を握るとユーザの自主的な行為を妨げてしまう
- 「自分でやっている」「自分でできた!」という感覚を持てるよう、AIロボットの振る舞いを決定する事が重要

機械的制御



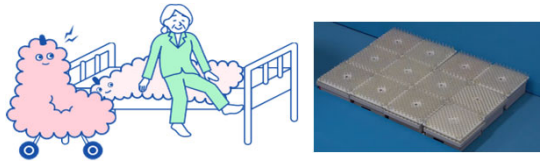
心理学的調整

# Robotic Nimbus

自由自在に人をアシストするロボットハードウェア群

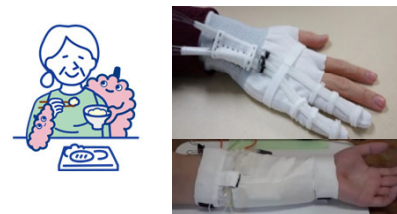
## Nimbus Holder

Holder for people and objects  
gently and firmly



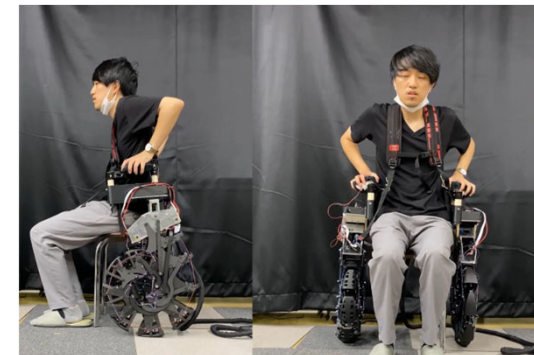
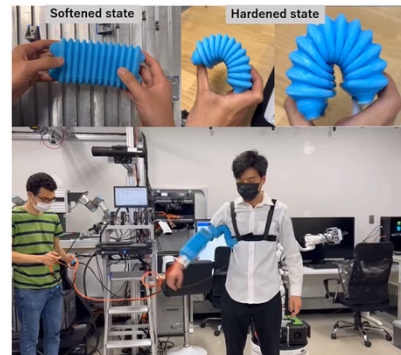
## Nimbus Wear

light and comfortable assistive  
and sensing wear

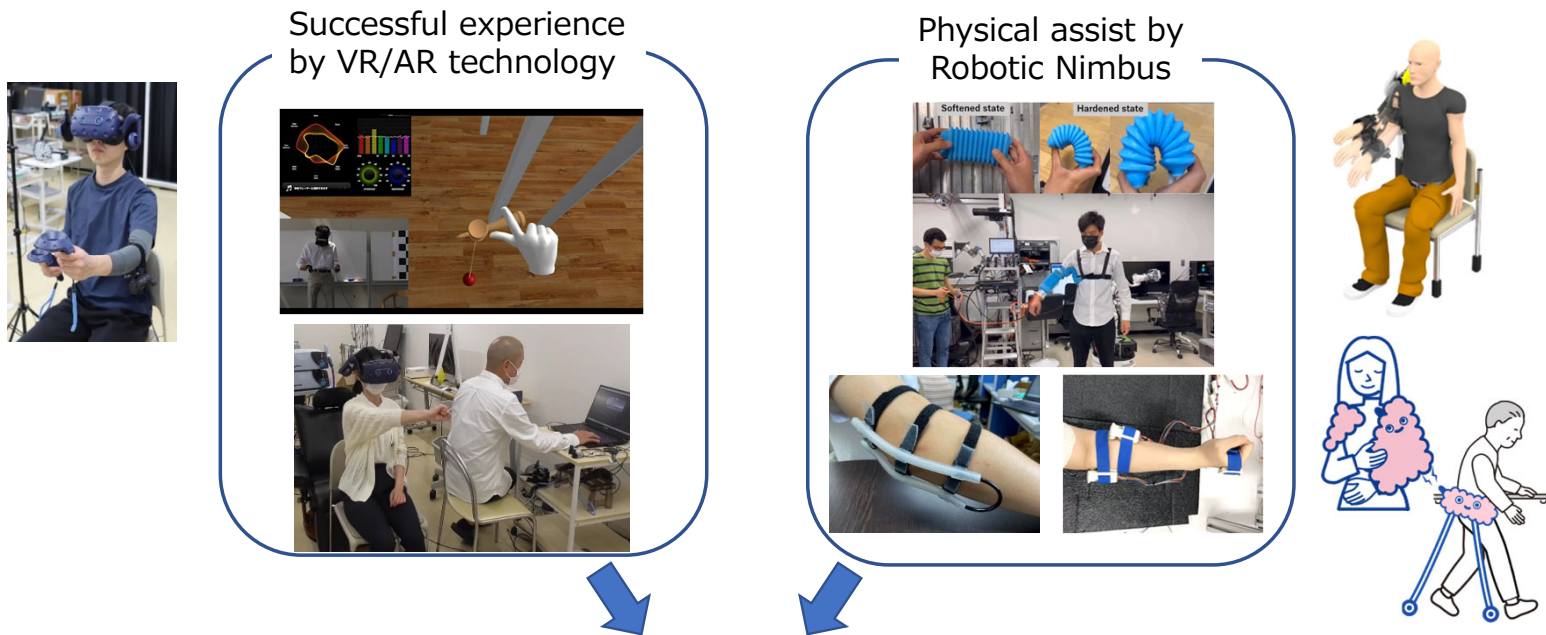


## Nimbus Limbs

Limbs that deform and expand  
according to their purpose



# 現実空間とVR空間の統合による成功体験の創出

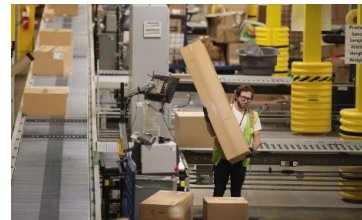
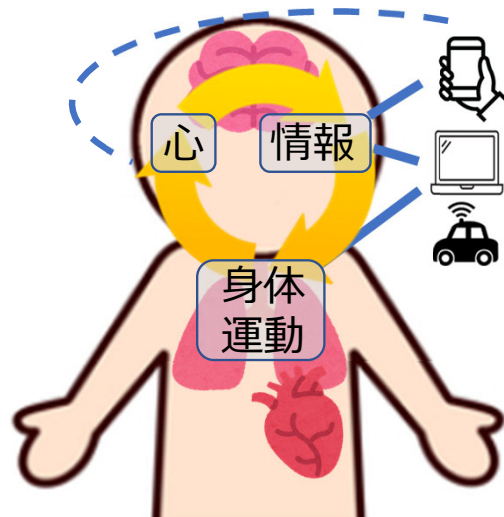


仮想的成功体験／物理的アシストの相乗効果による成功体験の強化

# 人とロボットの経験を拡張する VRデジタルツインの将来構想

# ウェルビーイングの現状

- ウェルビーイング=心身ともに健全な状態
- 心と身体は密接に連動：切り離せない
- 現状の情報システムは，身体側（情報・もの）に偏っている



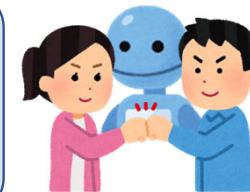
労働者のロボット化によるメンタル不全



情報過多による日常生活への悪影響

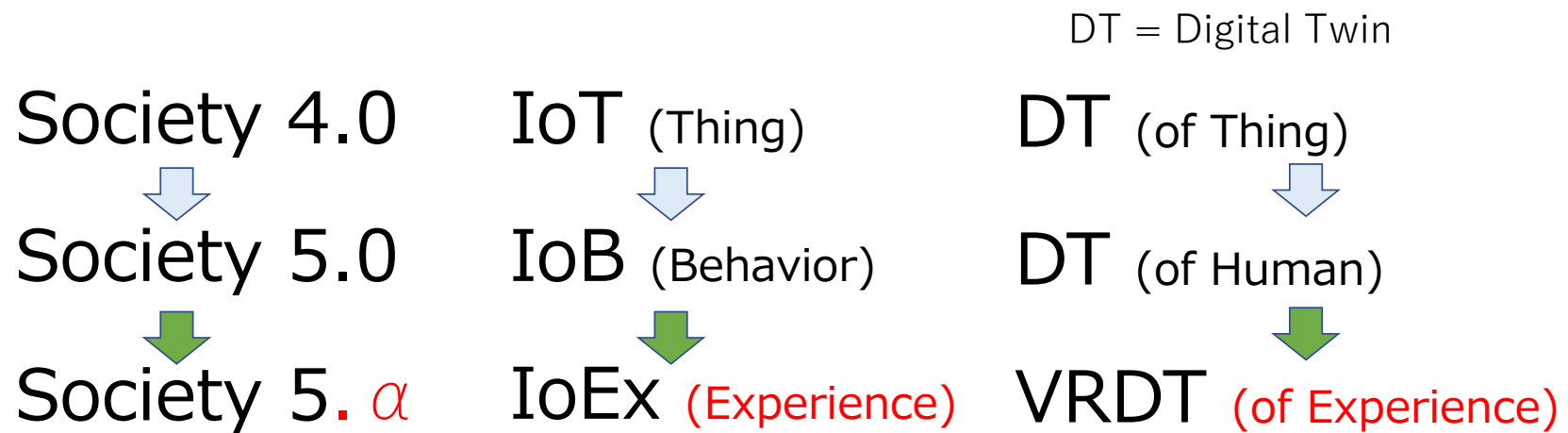
## 改善に向けた考え方

心と身体の相互作用の理解  
リアルな社会行動／コミュニケーションが  
心に及ぼす影響を考慮した社会基盤が必要



# 人間中心のCPS/Society5.0との関連

## 経験共有ロボティクスの立ち位置

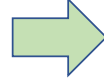


# 長期的な学術的挑戦

## 観察困難な人の内面のモデル化

	言語的 Linguistic	身体的 Physical	社会的 Social	精神的 Mental	
<b>IoB</b> (Behavior)	観測可能 介入は部分的に可能	音声言語 テキスト文 SNS	身体運動 ジェスチャ 筋電位 Lifelog tech	視線方向 注視点 GPS,SNS 購買履歴	生体信号 血中ホルモン 反応速度
<b>IoEx</b> (Experience)	観測不可 介入困難	概念 文脈	運動主体感 身体保有感	他者モデル メタ認知	情動 感情 自己効力感 Well-being

課題解決への  
アプローチ



確率生成モデル

予測符号化理論

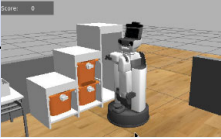



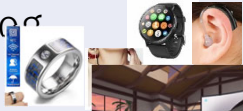




プロジェクション  
サイエンス

予測符号化理論

インタラクションの履歴（経験）からモデルを構築し  
次のインタラクションの創成へとつなげる

# デジタルツインとHRI

人とロボットの経験を共に拡張させ  
現実世界での行動をお互いに変容させ共進化していく基盤構築へ

	Robot (object) Only	Human only	Human + Robot
Digital Model	Offline Simu 	Digital Human 	Offline Simu 
Digital Shadow	Simulator + IoT 	Metaverse/Lifel or 	<b>SIGVerse</b> 
Digital Twin	Robot Controller 		



# 本日の発表のまとめ

- 人とロボットの経験を拡張するVRデジタルツイン
  - デジタルツインは現状「物のデジタルツイン」が主流
  - 今後「人のデジタルツイン」が発展していく
  - 人へのリアルタイムフィードバックにはVRが必須
  - 物理的／認知的支援の統合による行動変容技術への展開
  - 人とロボット/AIの共進化を支えるのはVRデジタルツイン

SIGVerse: Open Source

<http://www.sigverse.org/wiki/jp/>

どなたでもダウンロードしてお使い頂けます