

位置と力の模倣学習による ロボットの汎用物体操作

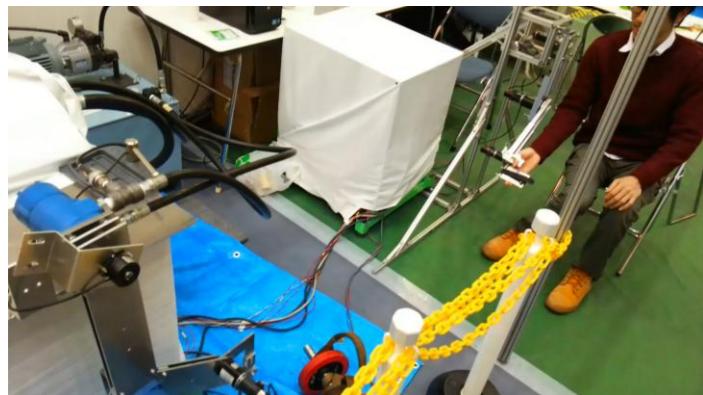
筑波大学 システム情報系
准教授 境野 翔

2025年9月16日

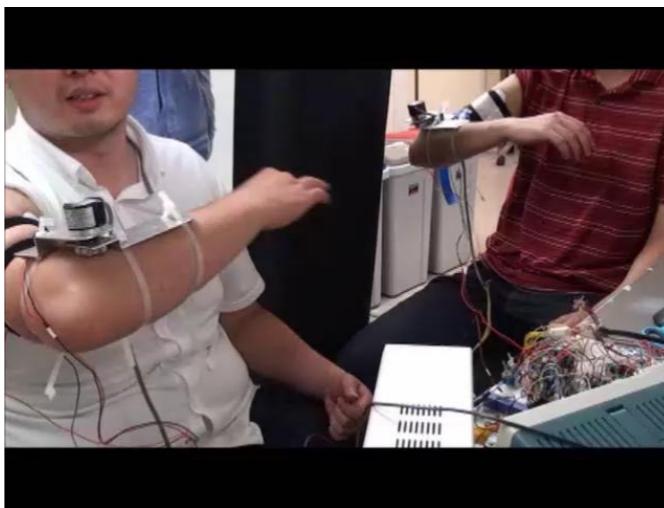
講演者について

筑波大学システム情報系
准教授 境野 翔

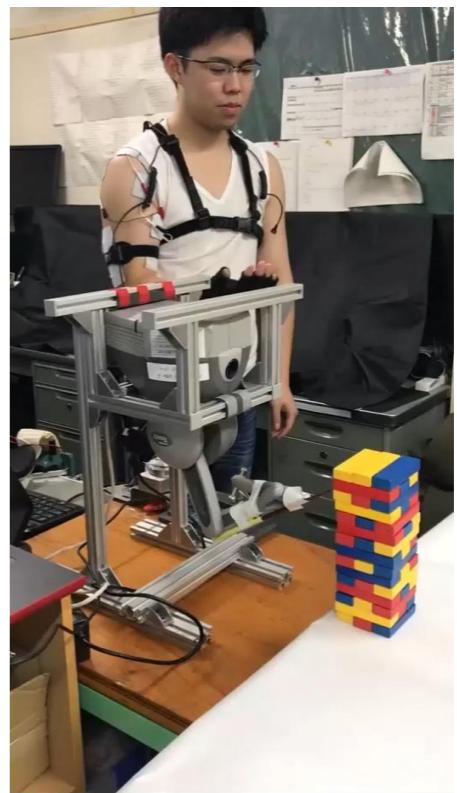
2011年3月慶應義塾大学大学院 博士(工学)
2011年4月-2019年3月 埼玉大学工学部 助教
2019年4月より現職



油圧ロボット



電気刺激による身体同期



電気刺激による力覚提示



前後輪独立駆動二輪車

背景

未だにロボット化されていない肉体労働は多い



エンジンの組立



野菜の箱詰め



倉庫のピッキング



科学実験



料理



手術

物体の配置・形状・剛性が毎回微妙に異なる

未知物体の操作の必要なタスク

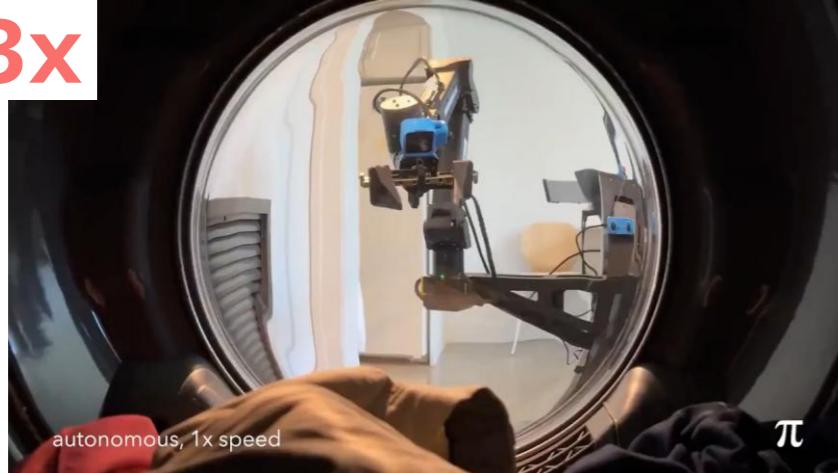
ロボットは高すぎる

実装期間
半年～1年

1動作
1000万円

Vision-Language-Action (VLA) モデル

3x



π

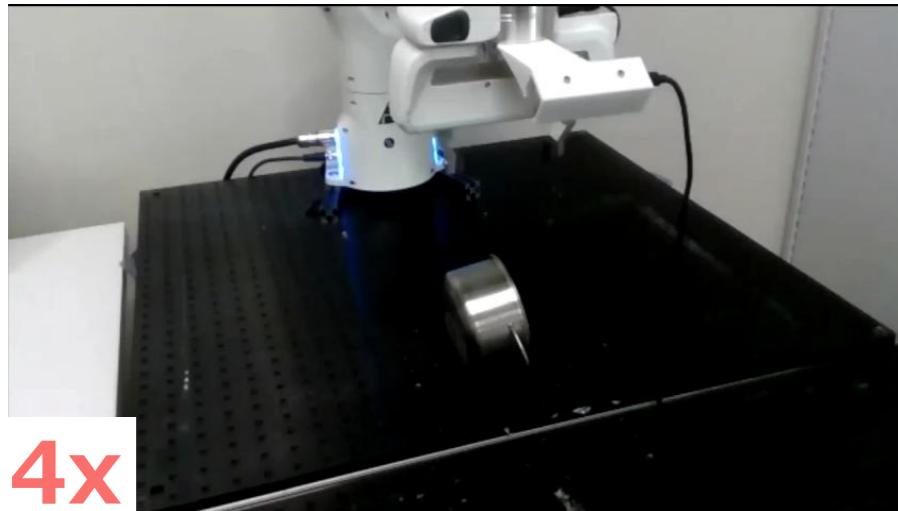
π_0 (2024)

4x



RDT-1B (2024)

4x



OpenVLA (2024)

画像や言語による動作生成
動作があまりに遅い

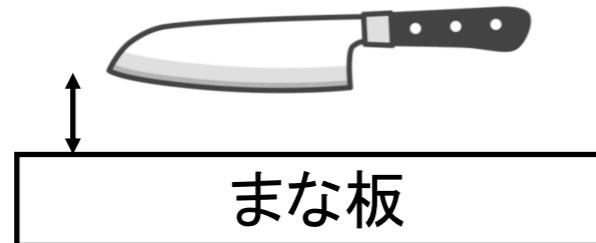
位置制御と力制御

位置制御と力制御による接触

包丁をまな板におしつけるには…？

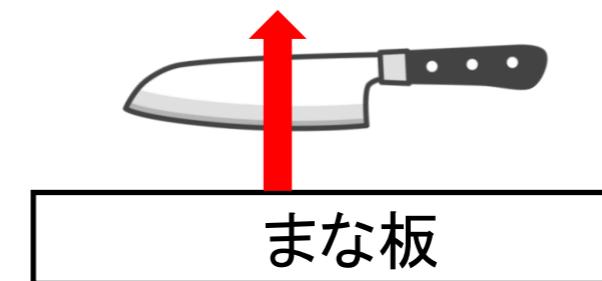
位置制御

正確な位置決めが必要



力制御

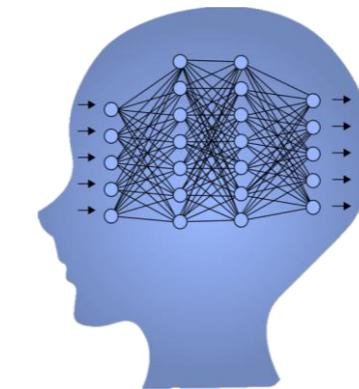
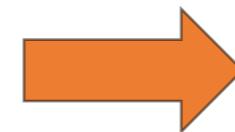
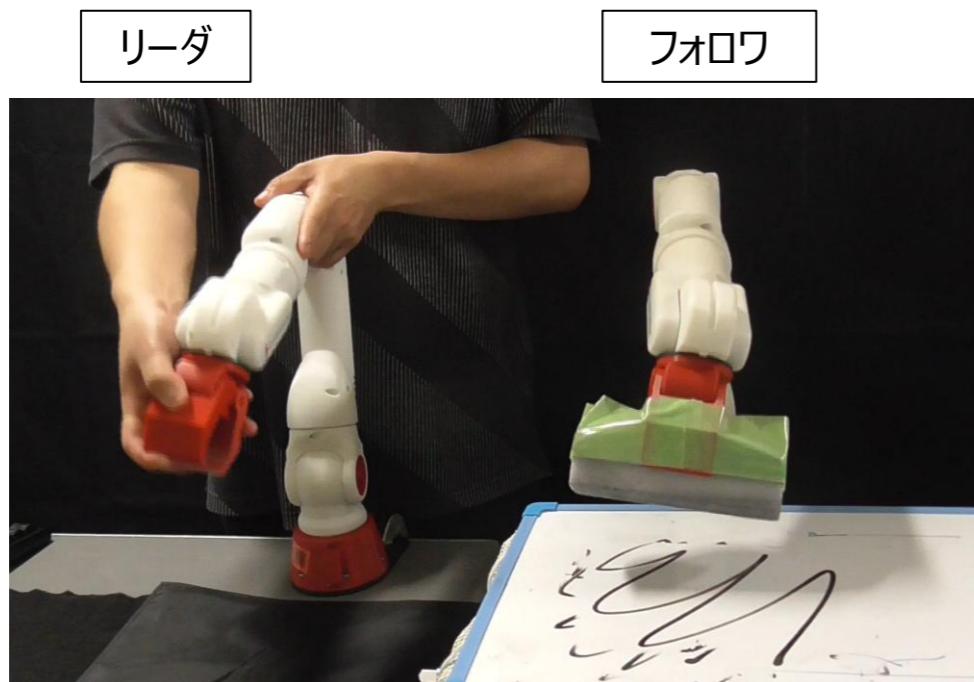
反力の大小は重要でない



力制御による接触の要求仕様緩和

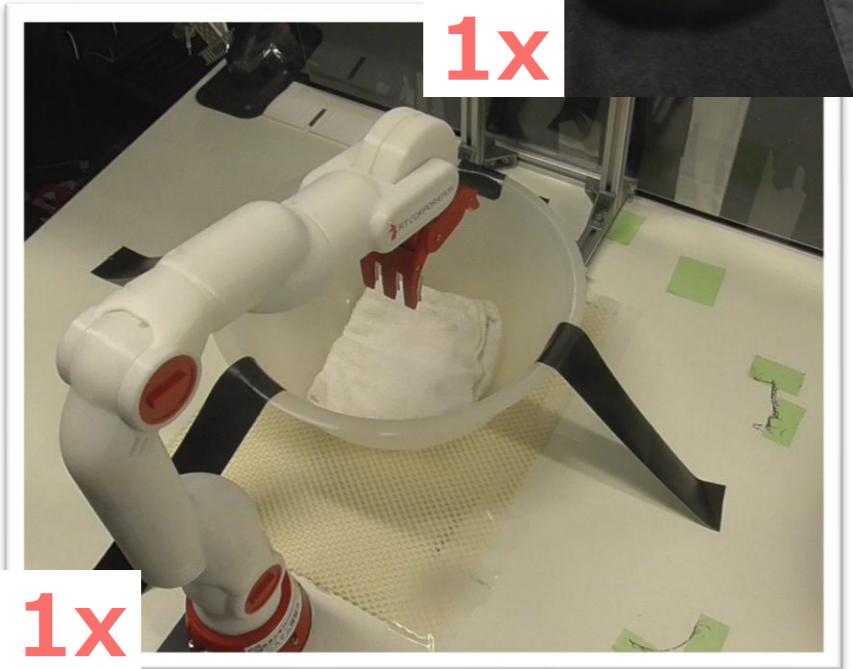
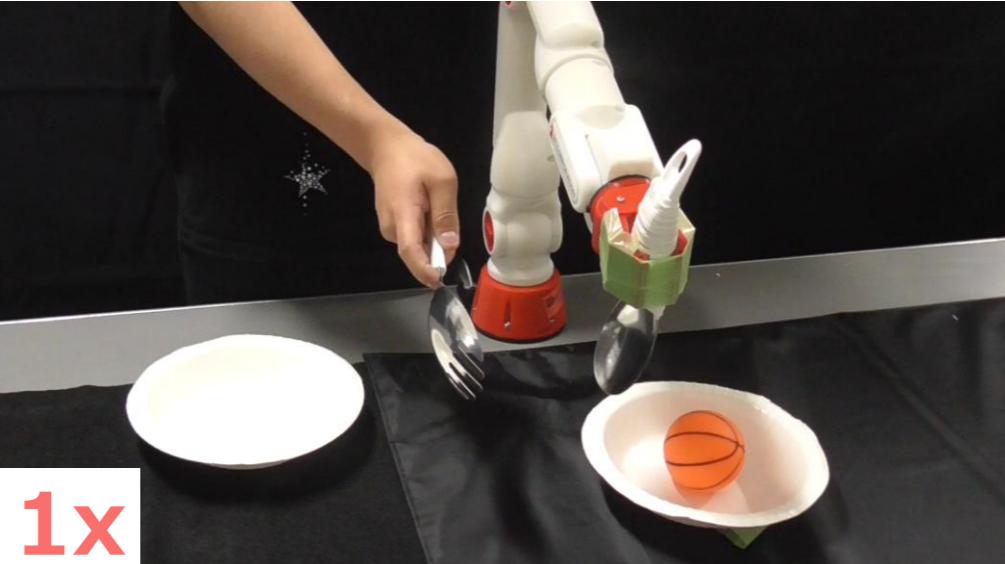
人間の技能の模倣

バイラテラル制御で力技能データ抽出



AIが模倣

人間並に速くなめらかな動作と 高い適応能力を両立



人間並に速くなめらかな動作と 高い適応能力を両立



国際ロボット展2023で4日間安定動作！！

Food Topping Challenge @ICRA2024で優勝！



バイラテラル制御に基づく模倣学習

- 人間並みに速くてなめらかな動作
- 力制御で未知環境へ適応
- 非常に少ない(せいぜい数回程度)動作教示

教示動作を変更するだけで汎用的な技能を獲得

ハードウェアの変更は必要なし

バイラテラル制御に基づく模倣学習

しかし…

- 動作の生成過程が人間に解釈困難
- 所望の動作を確実に行う保証なし

人間と比較して再現性・信頼性に乏しい

解釈可能で再現性の高い模倣学習が必要！

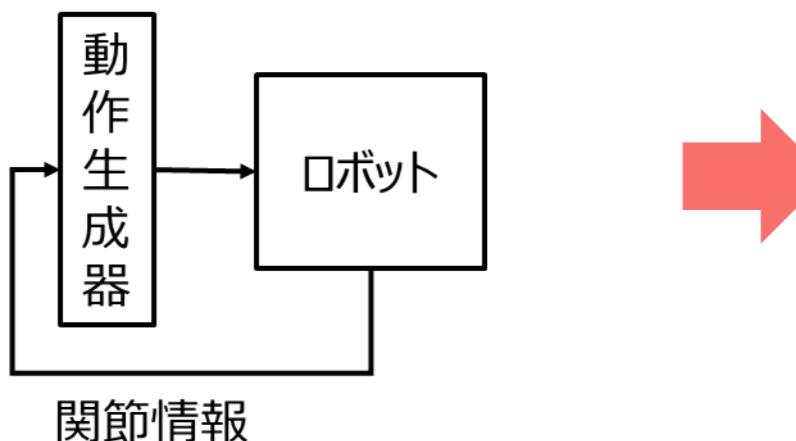
バイラテラル制御に基づく模倣学習

解釈性の高い模倣学習

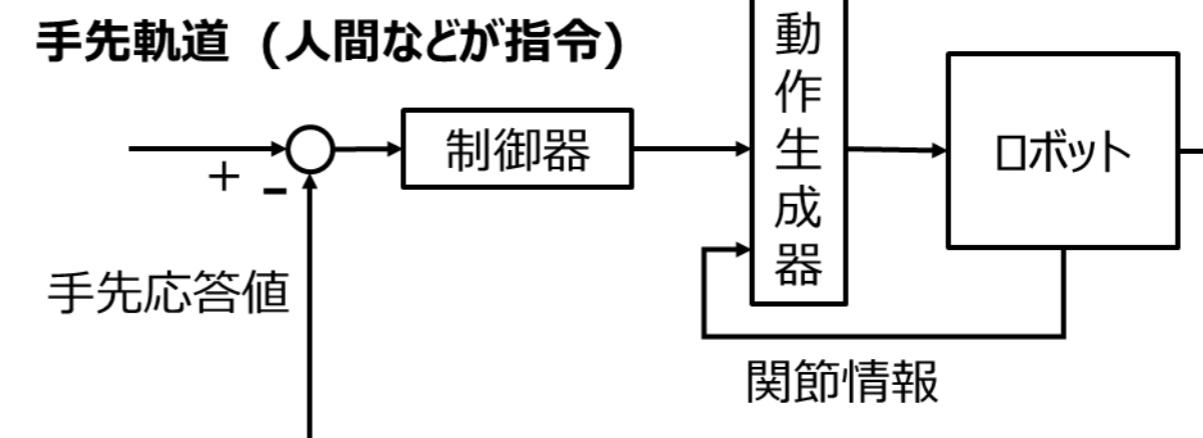
手先軌道は解釈性が高い



模倣学習

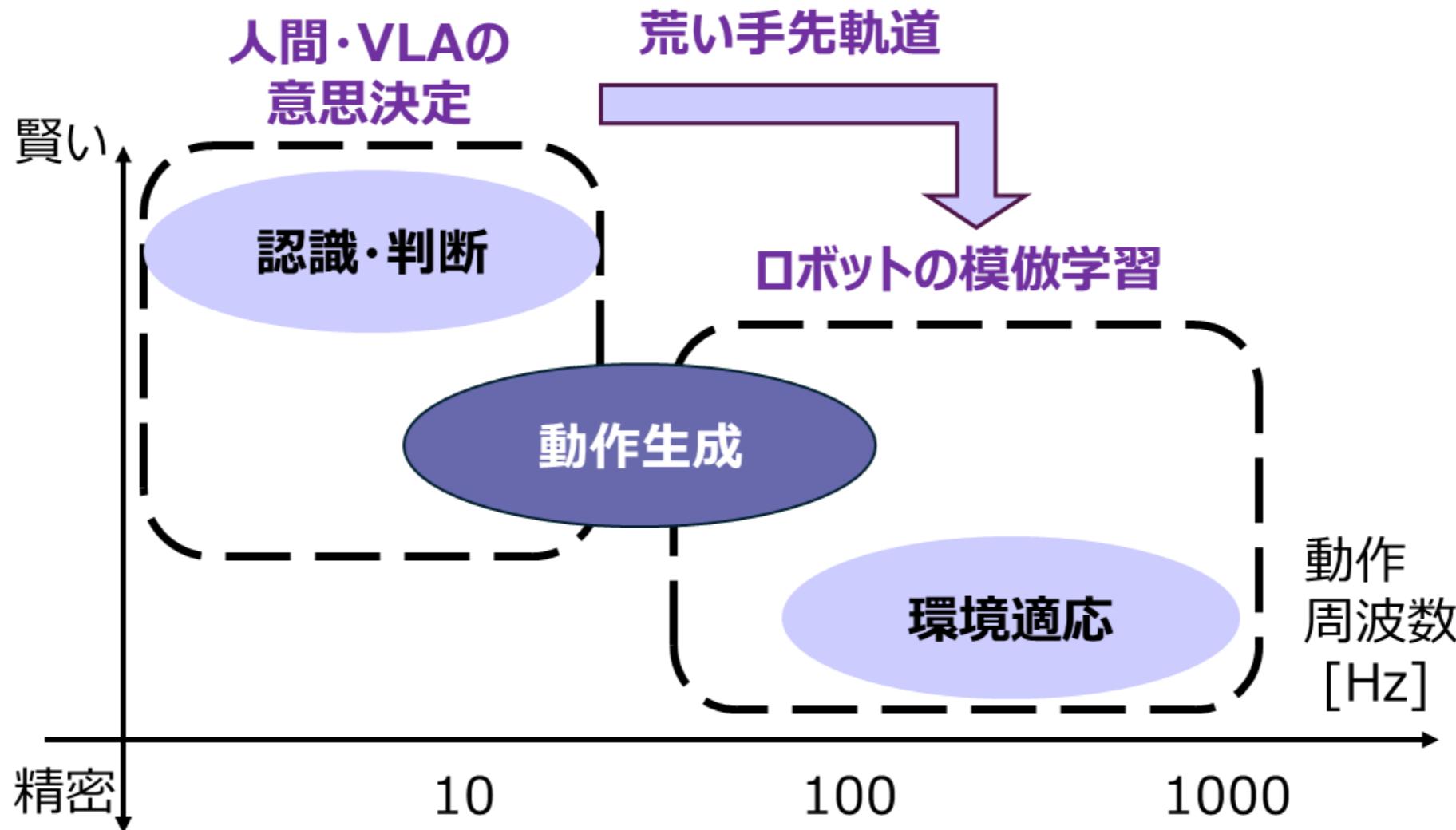


模倣学習への制御



新技術1: 制御可能な模倣学習

制御可能な模倣学習の確立



新技術1：制御可能な模倣学習

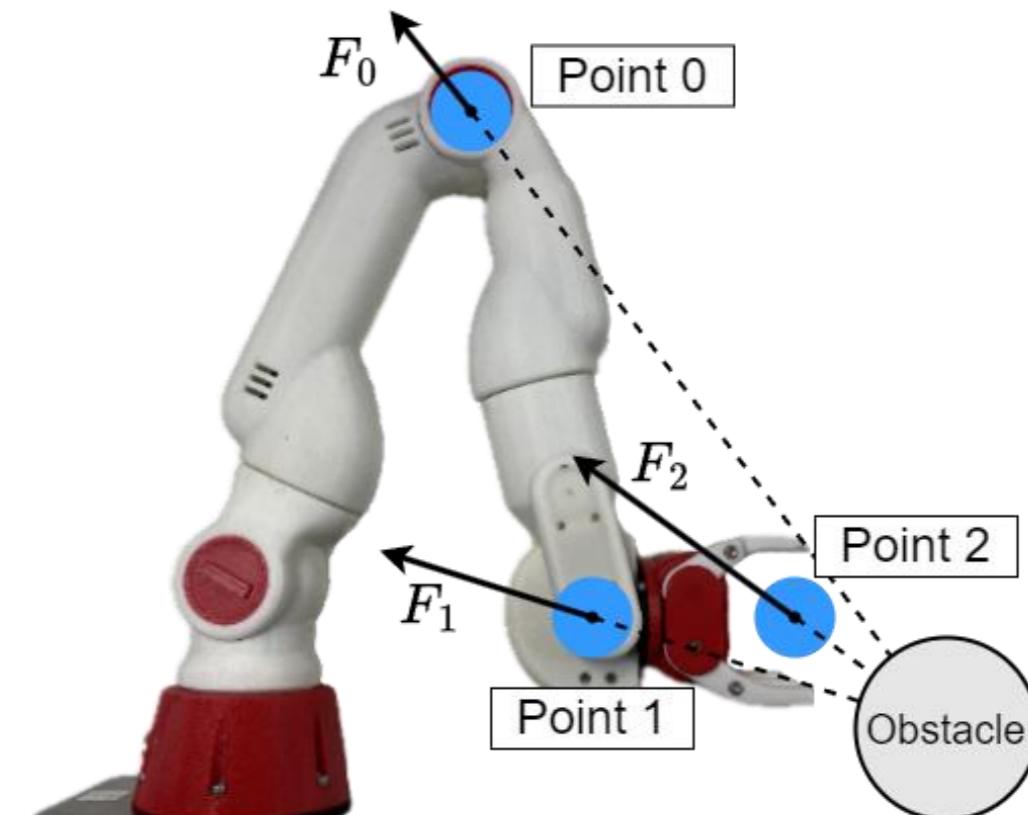
ポテンシャルから受ける仮想的な斥力

- ロボットに3つの作用点を設定
- 距離に反比例する力を与える

$$|F_i| = \frac{k}{d_i}$$

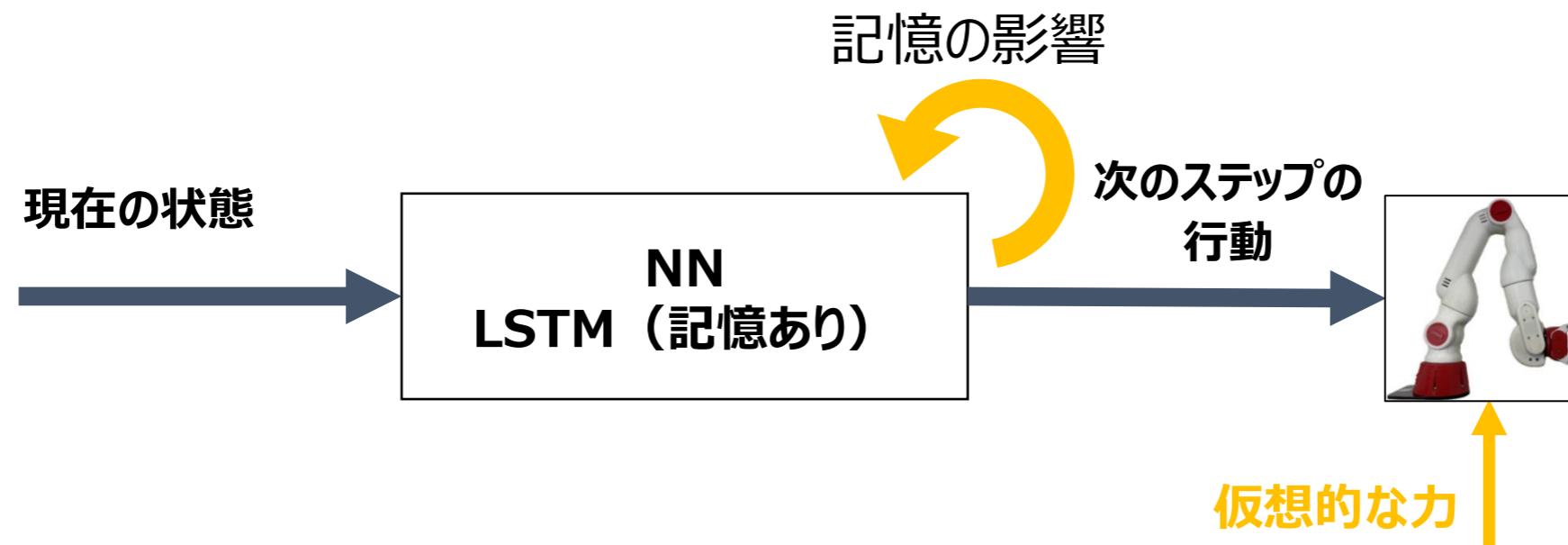
k … 比例係数

d_i … 障害物の表面と
作用点 i までの距離



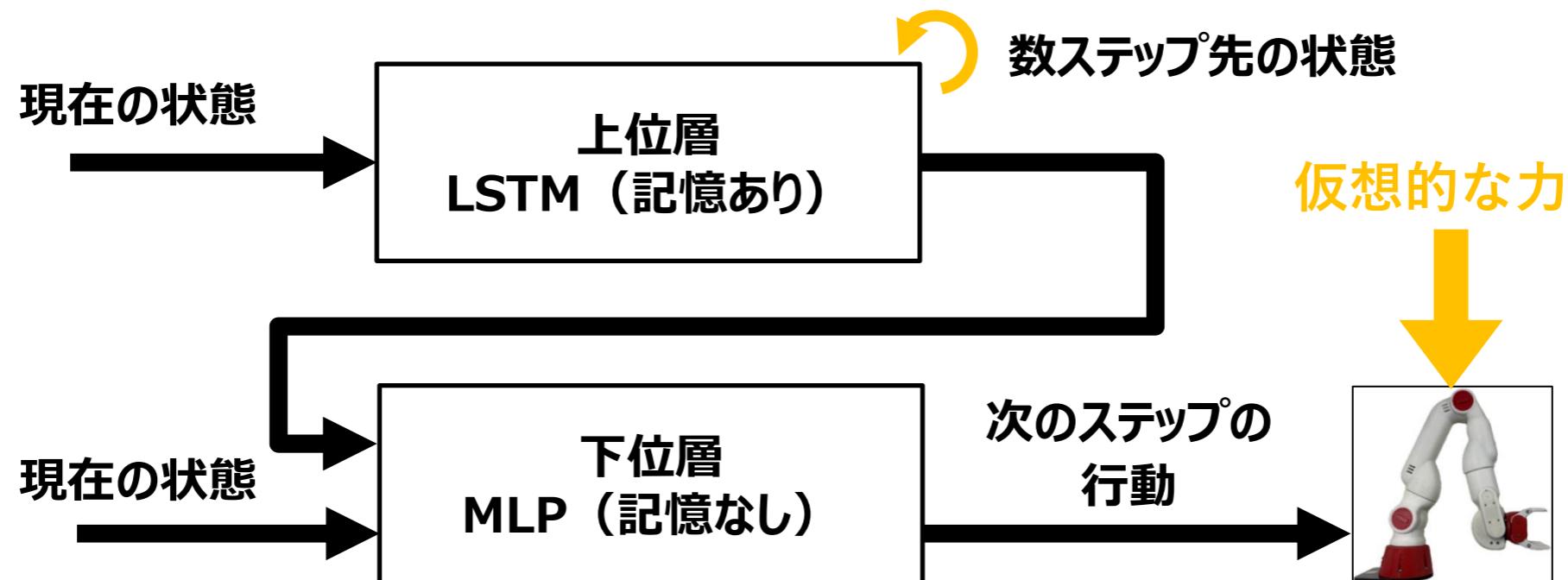
新技術1：制御可能な模倣学習

従来のモデルではポテンシャルに適応的な動作が困難



新技術1：制御可能な模倣学習

記憶の影響が小さい階層型モデル

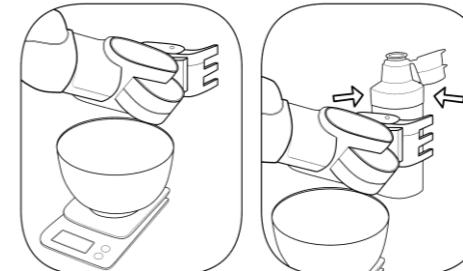
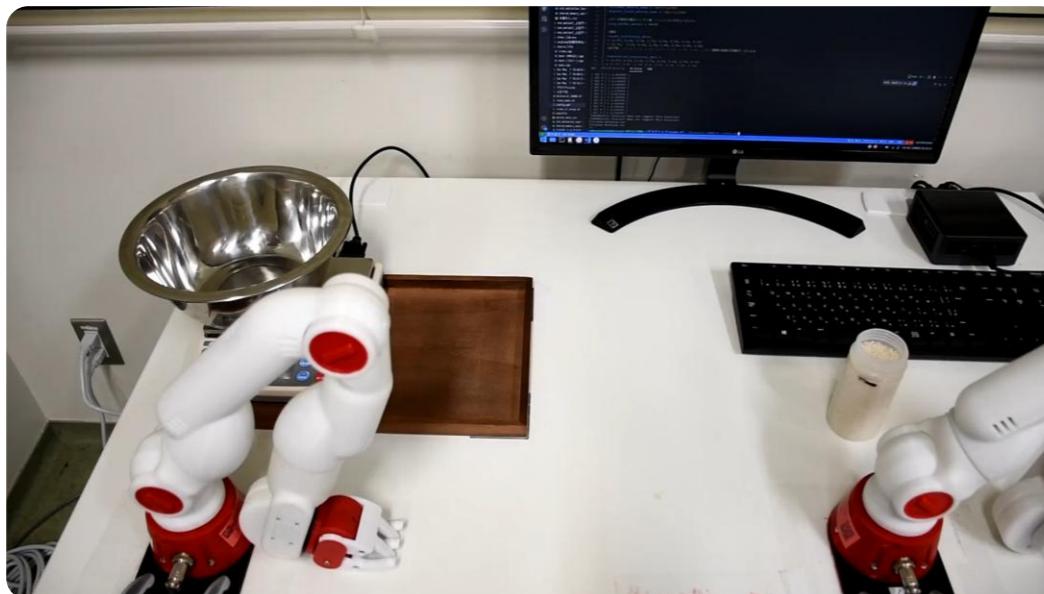


新技術1：制御可能な模倣學習

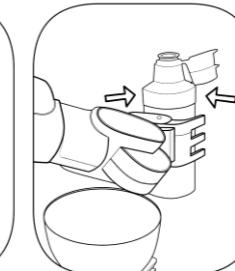
階層型モデルにより障害物回避が可能に



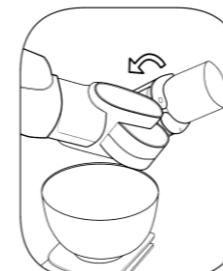
新技術2: 模倣学習の繰り返し学習制御



1.初期姿勢



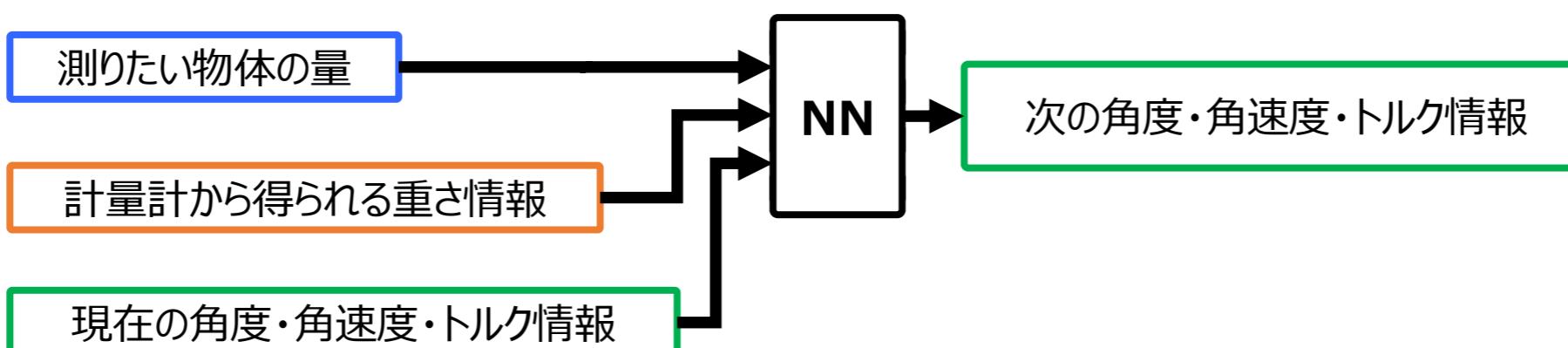
2.容器を持つ



3.容器を傾ける



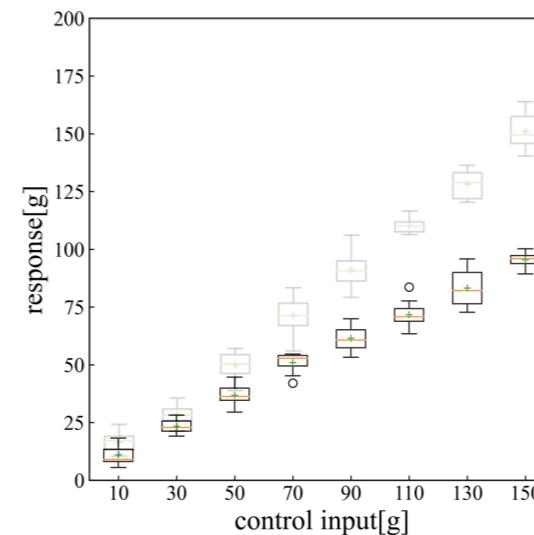
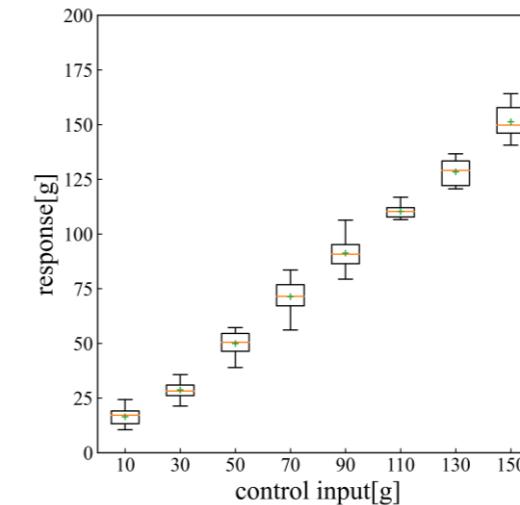
4.戻して保持



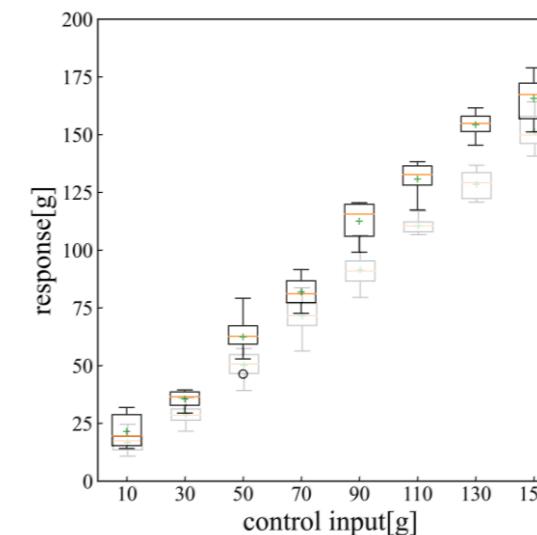
新技術2: 模倣学習の繰り返し学習制御



米で学習



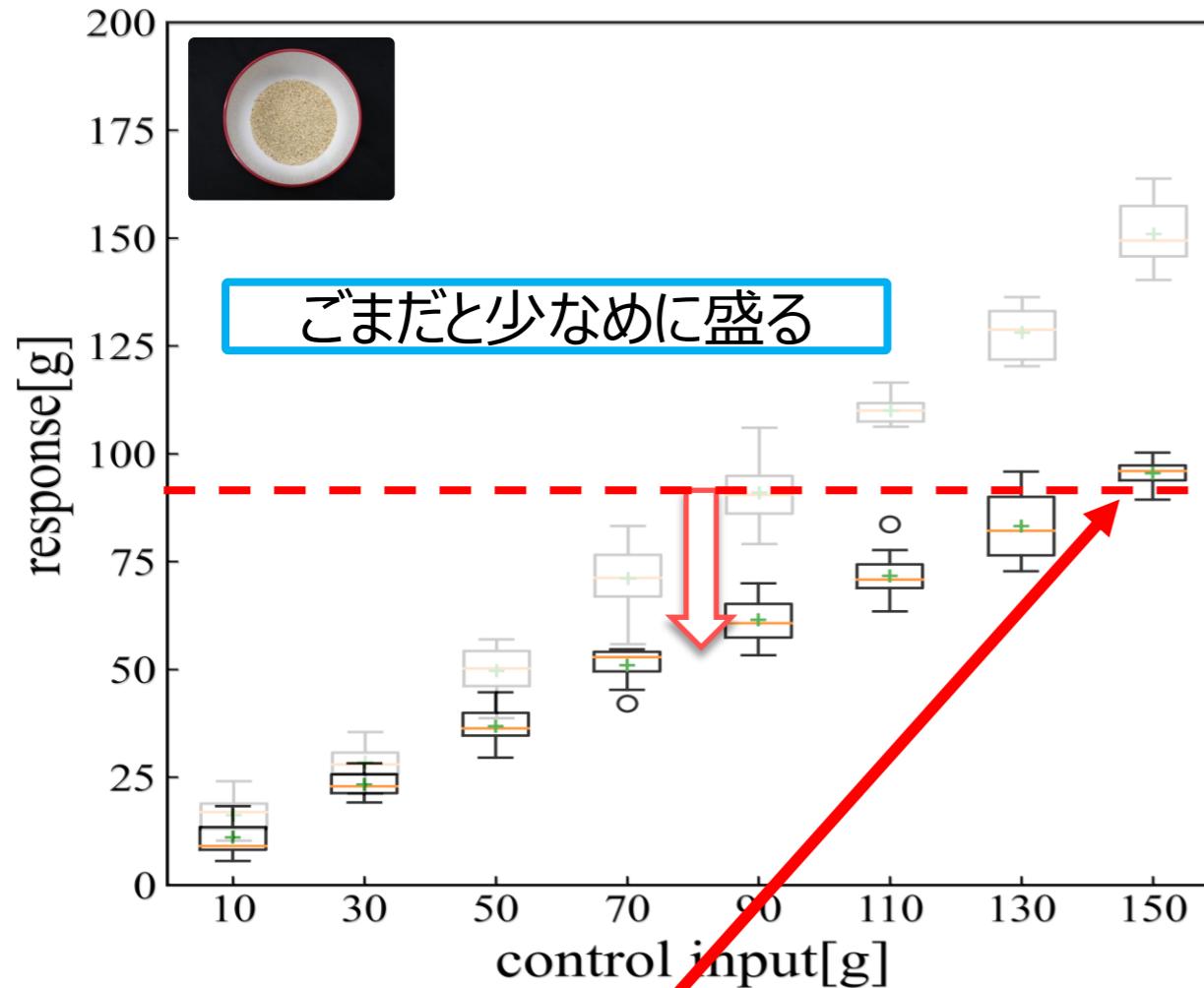
ごまだと少なめに盛る



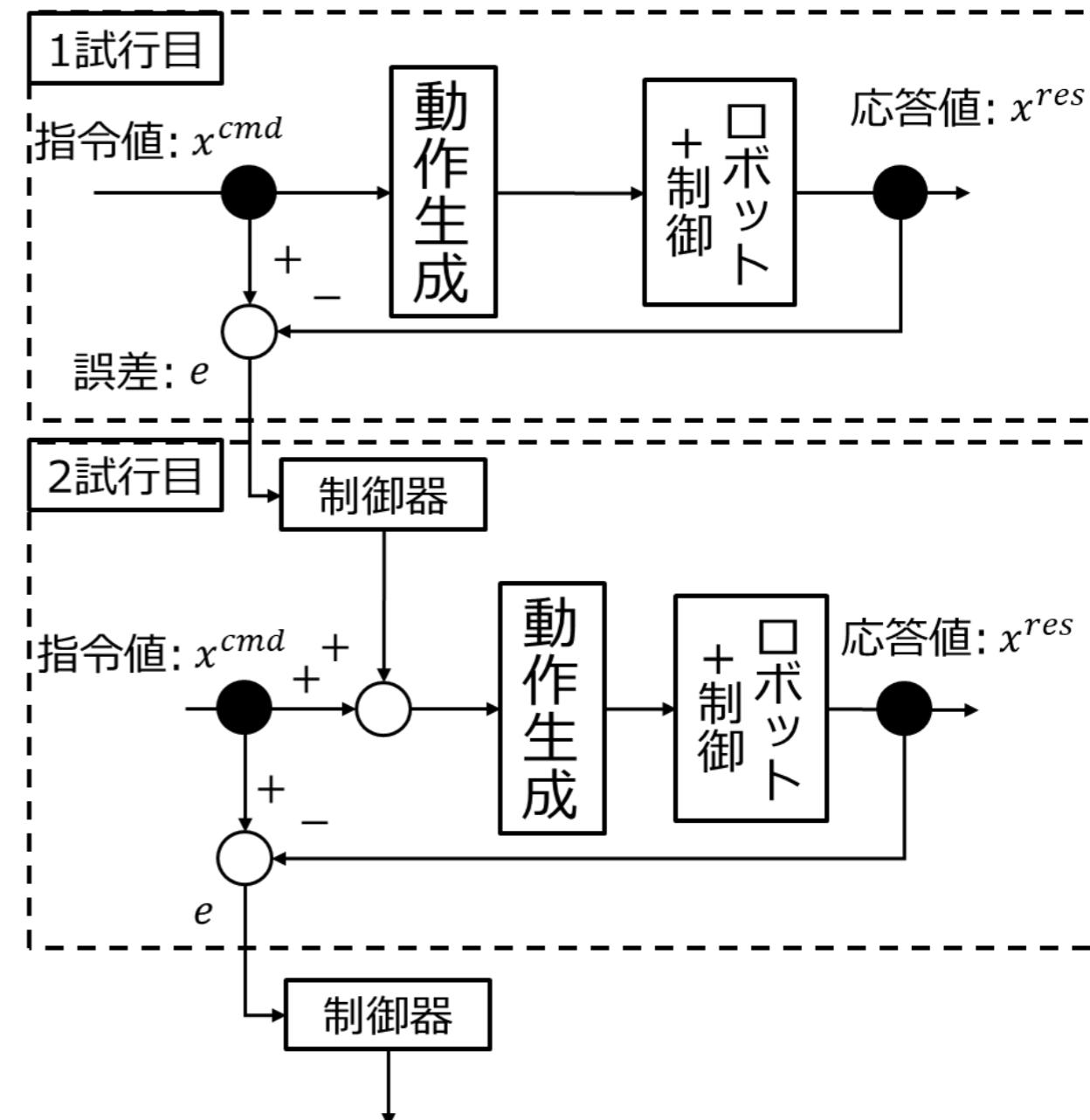
小豆だと多めに盛る

教師データにないものでは誤差は出るが、指令値を増やすと応答値が増える関係は維持される

新技術2: 模倣学習の繰り返し学習制御



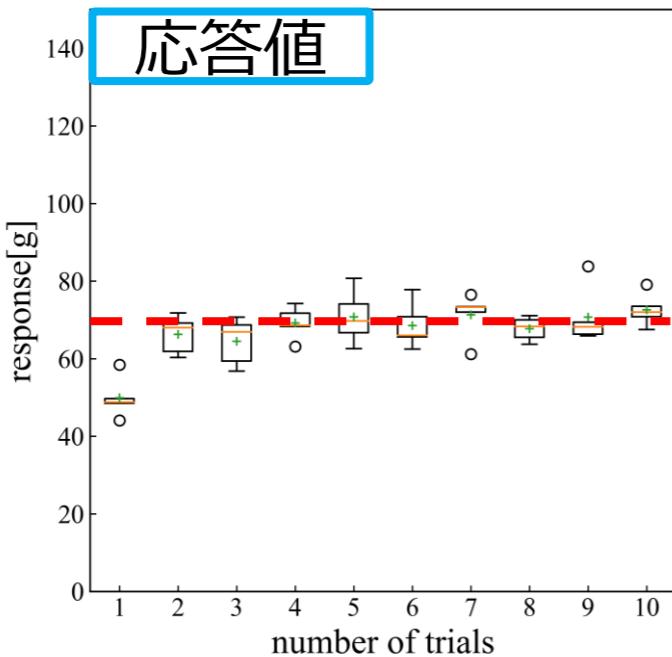
指令値を150g程度にすれば
ごまを90g盛り付けられるのでは？



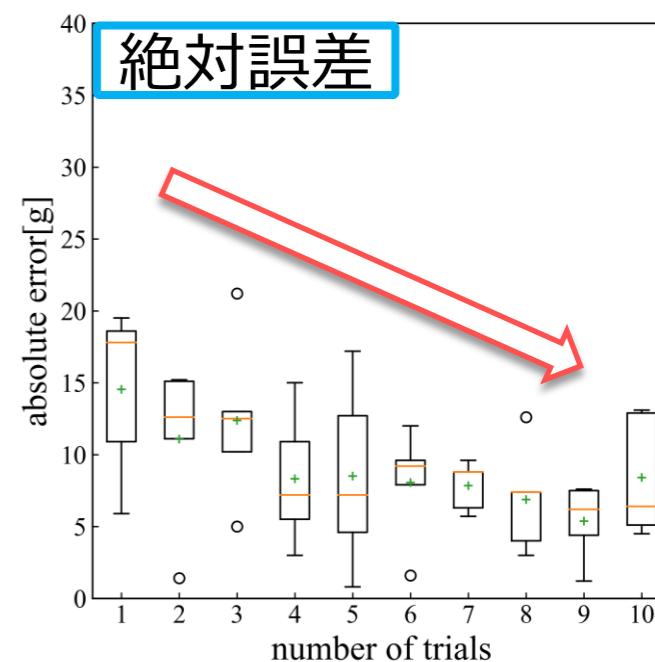
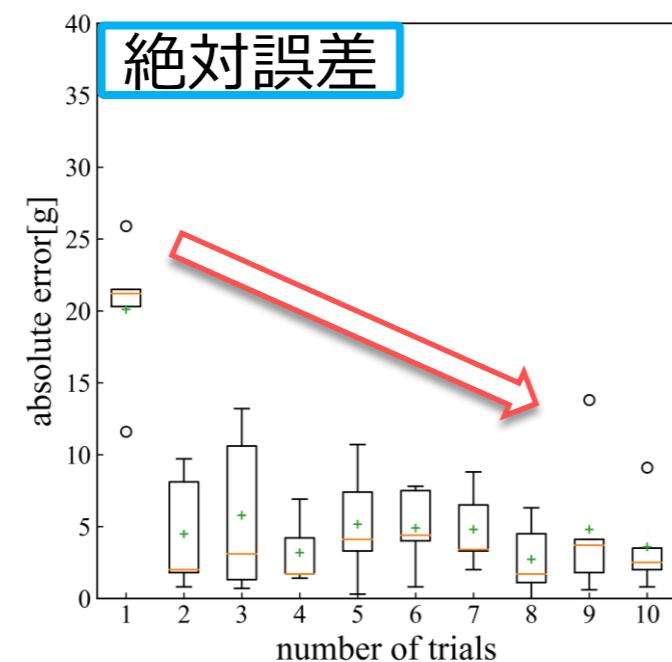
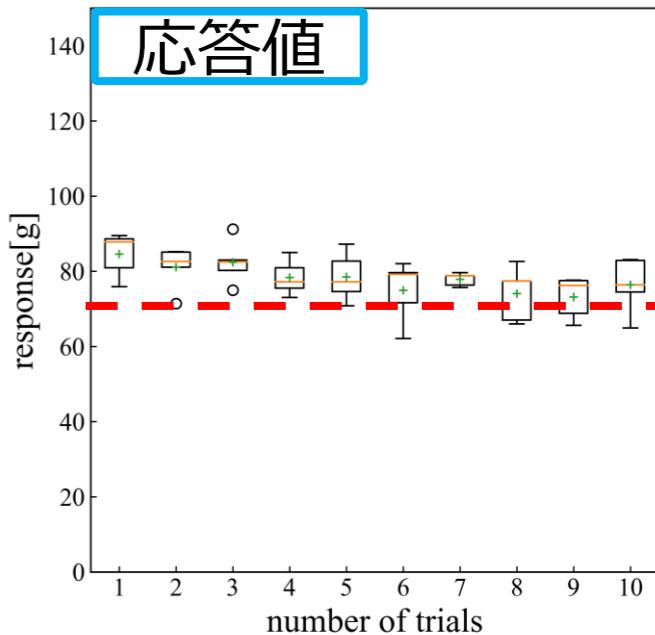
新技術2: 模倣学習の繰り返し学習制御



ごま



小豆



新技術の特徴・従来技術との比較

	本発明	競合技術1 (繰り返し学習制御)	競合技術2 (模倣学習)	競合技術3 (強化学習)
構成	学習済みモデルへの制御	線形システムへの繰り返し制御	人間の動作の模倣・再現	報酬に基づく動作の学習
動作の解釈性	○	◎	×	△
動作の再現性	○	◎	×	×
動作の精密性	○	◎	△	×
汎化性能	◎	×	○	△
適用分野	不定形物や乱雑な環境の操作(食品製造業・家事等)	操作対象が完全に既知のタスク(工場の製造機械等)	不定形物や乱雑な環境のタスク(食品製造業・家事等)	歩行ロボット、パラメータチューニング
優位性	人間のような適応能力と解釈性・再現性を両立	超高精度な動作が可能	人間のような適応能力を実現	報酬という曖昧な情報から動作を生成可能

想定される用途

- 専用ハードウェア不要なので**市販ロボット**でOK
- 遠隔操作ができる動作ならすべて自動化可能
- 動作を教示するだけなので**プログラミング不要**



- 組立作業、食品操作、塗装、研磨、
拭き掃除、料理、物流、その他大多数の肉体労働

実用化に向けた課題

- 学習ベースのアルゴリズムであるため、確実に成功する保証がない。
それでも許容される初期ユースケースが必要。
- 遠隔操作での動作教示は困難であり、よい教師データを収集することが困難。
(これを解決する新たな技術も出願済)

社会実装への道筋

時期	取り組む課題や明らかにしたい原理等	社会実装へ取り組みについて記載
基礎研究	・模倣学習の基礎モデルの検証が完了	
現在	・模倣学習と制御の統合を開始 ・遠隔操作データの質の向上法を確立	
1年後	・信頼性と再現性の高い模倣学習を確立 ・質の高い動作データベースを収集開始	共同研究先での実証試験
2年後	・VLAなどの大規模モデルとの連携方法を確立 ・初見の環境でも適応可能なモデルの確立	共同研究先での実運用開始

企業への期待

- ・「とにかく現場に試しに入れてみたい！」
と考える企業様を探しています。
- ・想定される市場規模が大きいだけに
米中を始め多くの競合が存在するので、
じっくり基礎研究から安全性・確実性を
担保しながら実装する時間がありません。
- ・Minimum Viable Product (MVP)を作りましょう。

企業への貢献、PRポイント

- 本技術は汎用ロボットで人間の肉体労働を代替可能
- 動作を教示するだけでよいので、
エンドユーザには制御や学習の知識が不要
- 1台のロボットが複数のタスクを遂行可能
→1タスクあたりの価格を低減
- 20~30回動作を取り直せば新しい動作を学習可能
→食品工場で季節物の惣菜に対応するような
突発的な動作の変更・調整も容易

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 学習装置、ロボットシステム及び学習方法
- 出願番号 : 特願2024-093817
- 出願人 : 国立大学法人筑波大学
- 発明者 : 境野 翔

- 発明の名称 : ロボット制御装置、ロボット制御方法及びプログラム
- 出願番号 : 特願2024-099569
- 出願人 : 国立大学法人筑波大学
- 発明者 : 境野 翔

お問い合わせ先

筑波大学

国際産学連携本部 共同研究(民間企業)担当

e-mail kyo-dok@un.tsukuba.ac.jp

Webからのお問合せ :

https://www.sanrenhonbu.tsukuba.ac.jp/joint-research/for_company/