

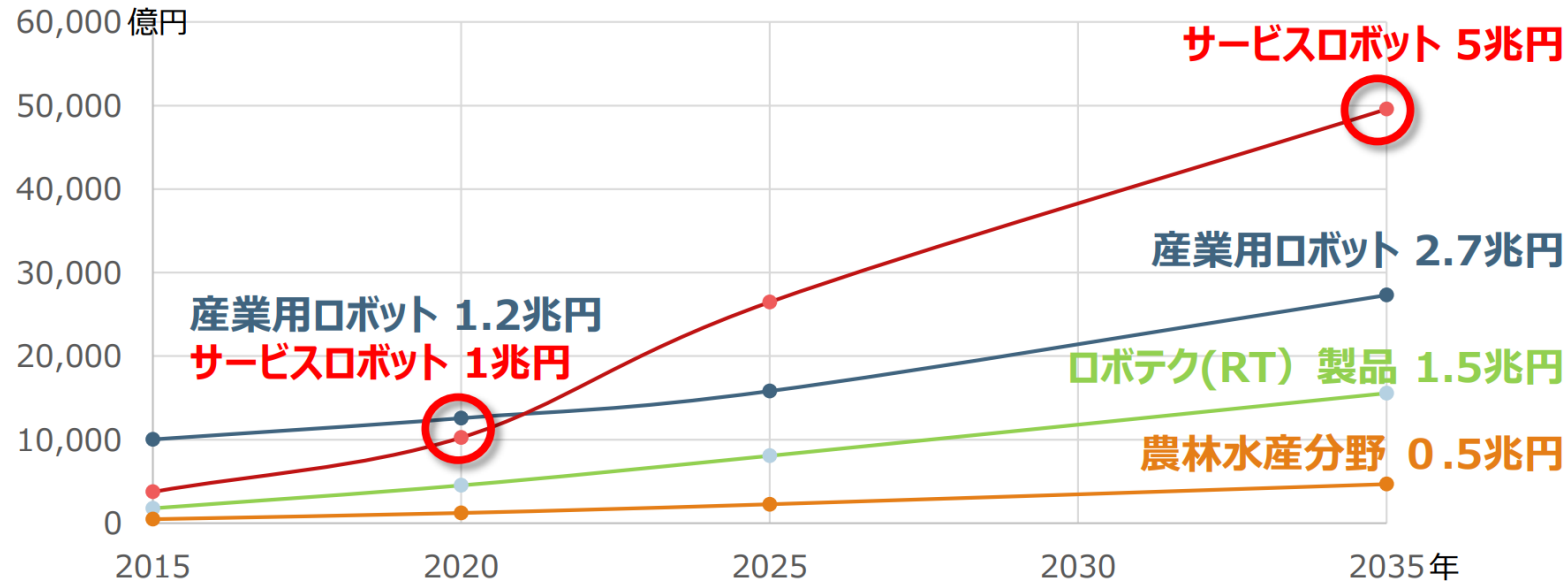
2023年7月25日(火)

人との協調作業が可能な スマートロボット

早稲田大学 次世代ロボット研究機構
次席研究員 三宅 太文

研究背景

2035年に向けたロボット産業の将来市場予測



NEDOが2010年に公表した「ロボットの将来市場予測」を元に野村総合研究所が作成(2016)

アバターロボット
「newme」(ANA)
<https://robotstart.info/2020/08/19/newme-mirai.html>

自律移動コミュニケーションロボット
「AYUDA」(CIJ)
<https://robotstart.info/2020/09/03/ayuda-fujisawa.html>

自律案内ロボット
「HOSPI Signage」(Panasonic)
<https://www.panasonic.com/jp/company/ppe/hospisignage.html>

アーム付き自律搬送ロボット
「ACUR-C」(スマイルロボティクス)
<https://robotstart.info/2021/03/26/smilerobo-pcr.html>

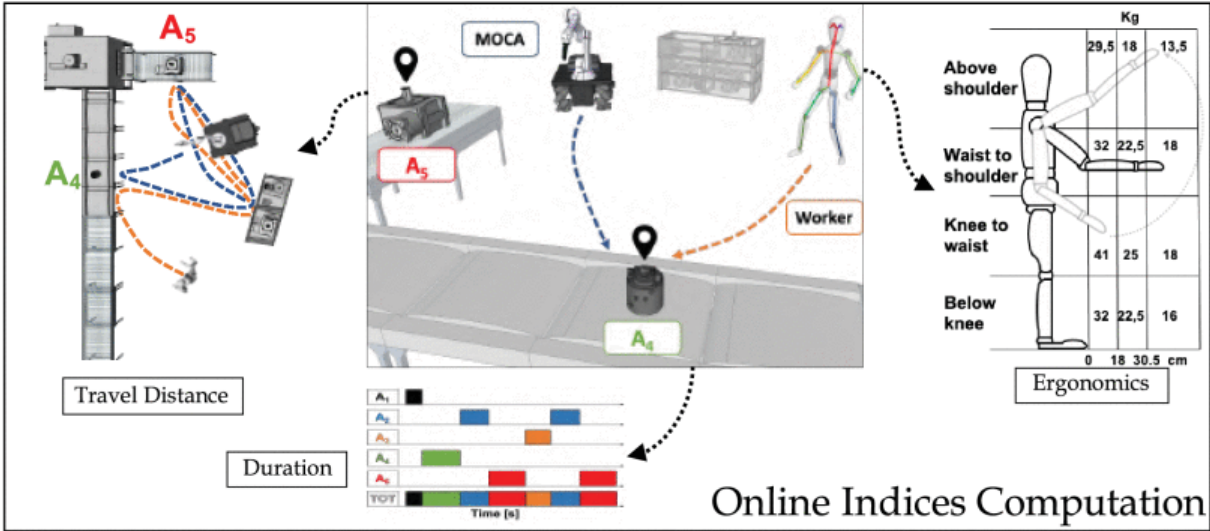
警備ロボット「SQ-2」
(SEQSENSE)
<https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000004.000025363.html>

人と関わるためのロボット技術がますます重要となる

協働作業に関する従来研究



人の行動決定に合わせながら、逐次的に実行するタスクの順番・組合せをコストに基づいて計画する



コスト要素

- タスクの実行時間
- 人のタスクの労力
 - ロボットが労力の大きいタスクを率先して請け負う
- 両者の移動距離
 - 人から離れたタスクの中でロボットに近いタスクを選択



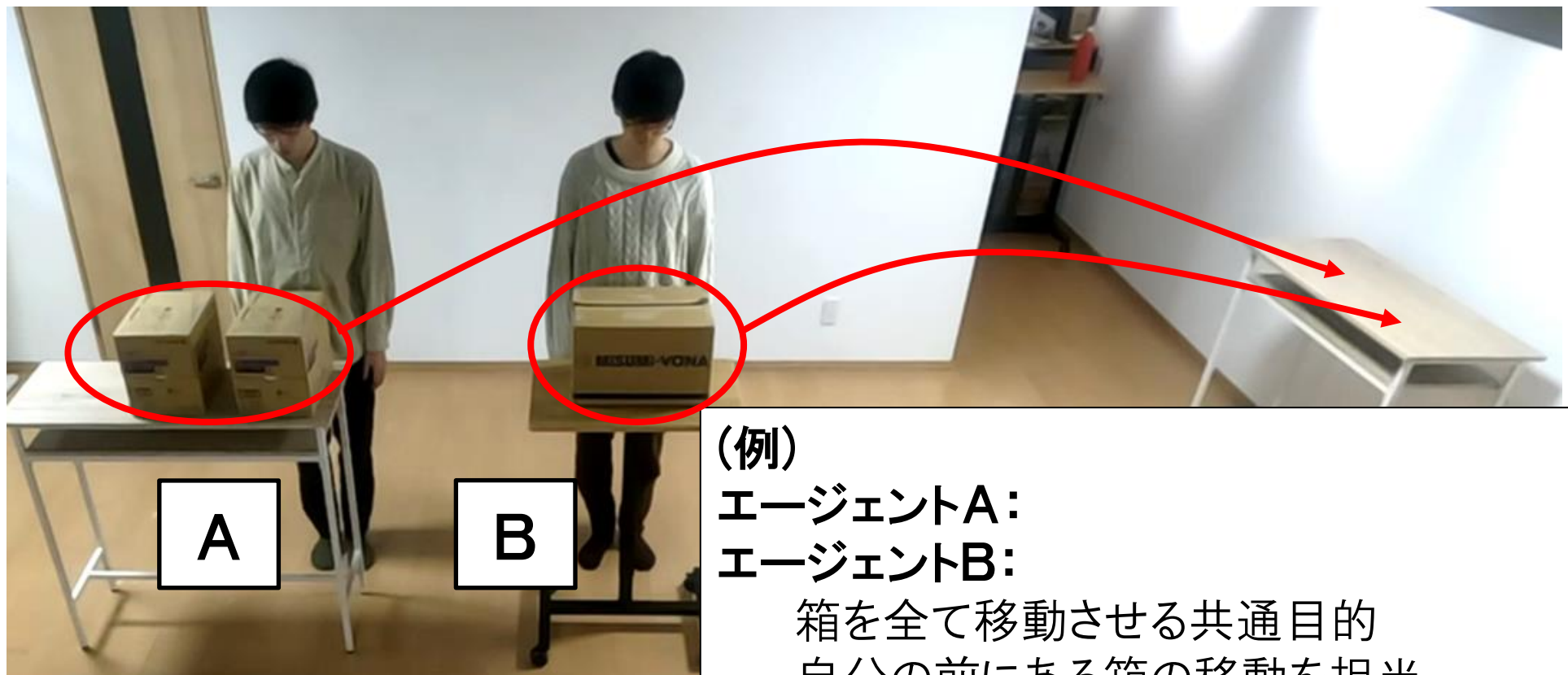
A Human-Aware Method to Plan Complex Cooperative and Autonomous Tasks using Behavior Trees [F. Fusaro+, 2021]

実行するタスクの順番・組合せを最適化し、
協働作業の効率向上を図る研究が多く行われている

協働技術の必要性

作業現場において、通常は各作業者が自身に与えられたタスクを行うが、**相手との主張・同調に基づく「協働譲り合い行動」**を考慮することでより円滑な協働作業を実現できる

依頼…自分の作業効率が大きくなるよう、相手に行動を変更してもらう行動
支援…相手の作業効率が大きくなるよう、自分が行動を変更する行動



通常行動

両者が自分に与えられたタスクを実行する場合



共通の目的を持って協働しているにも関わらず
Aに対してBの作業していない時間が長い

協働譲り合い行動

協働譲り合い行動を取った場合



通常行動より両者の作業時間の差が小さくなり
その結果全体の作業時間も減少している

協働譲り合いに関連した先行研究



人主導型支援



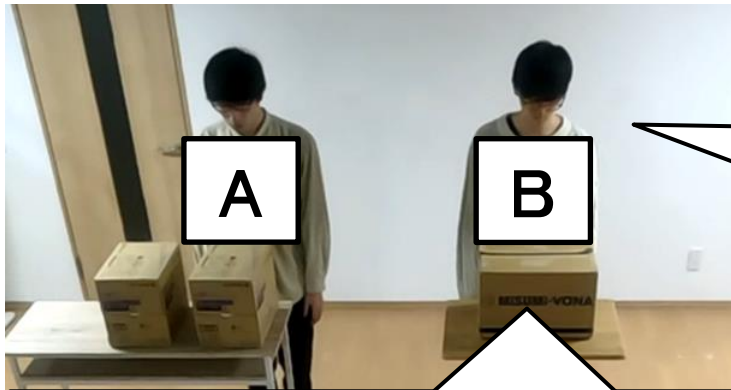
**ロボット主導型
リアクティブ支援**



**ロボット主導型
プロアクティブ支援**

ロボットが支援する際の主張の度合いを3段階に分け、各パターンの行動決定モデルを作成し評価している

Initiative in Robot Assistance during Collaborative Task Execution [J. Baraglia他, 2016]



相手との譲り合い
支援の必要はないと考えていたがAが依頼を主張したので支援を行う

AとBのタスク量の比重
Aと比べてBのタスクの量が多い場合はBが自分のタスクに専念する方が全体の効率が良い

より円滑な協働作業を実現するためにはお互いの状況や協働者の行動意図に応じた依頼・支援行動, 主張・同調の判断が必要

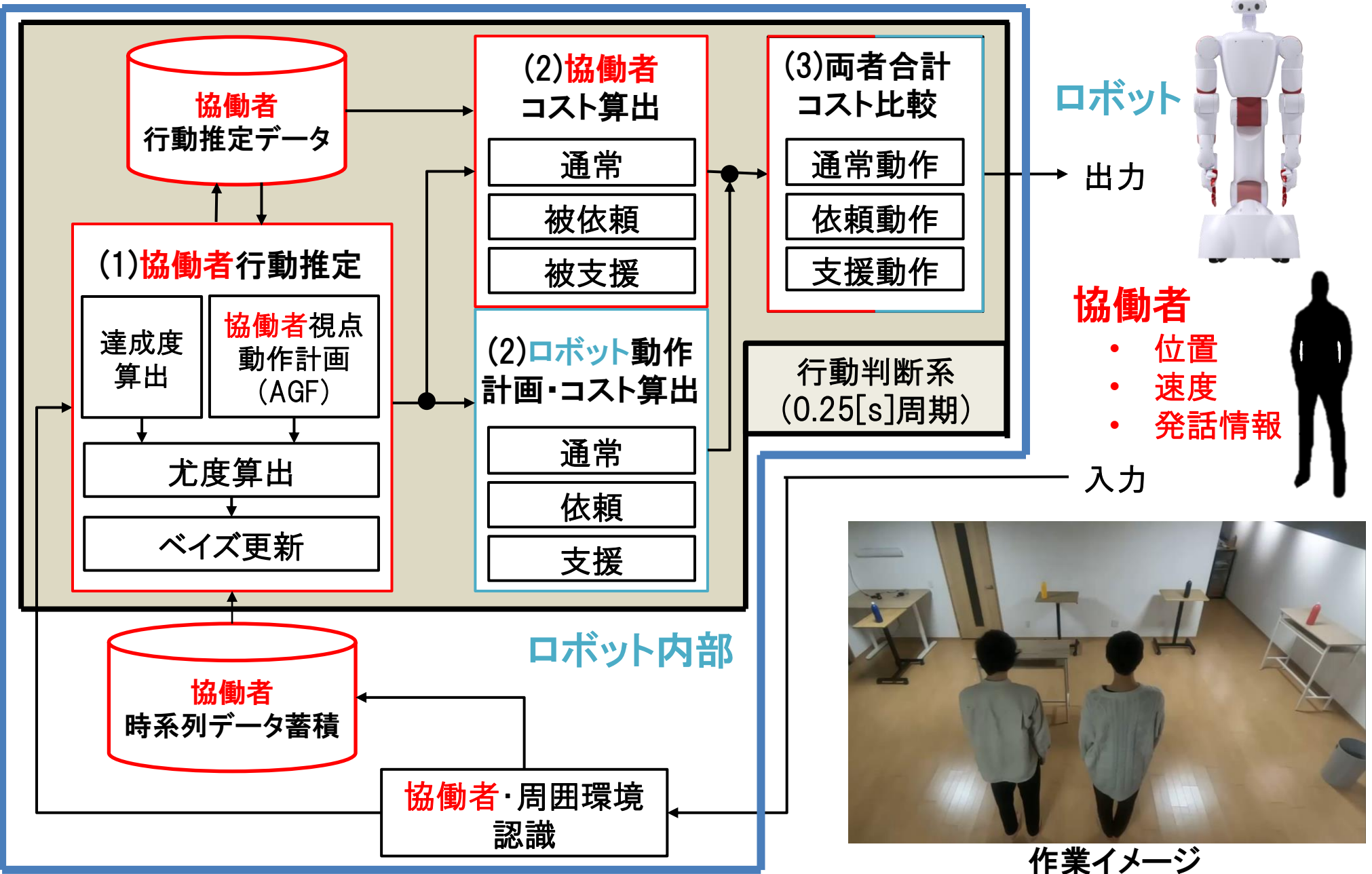
提案する新技術

協働作業ロボットが状況に応じて、依頼・支援という協働譲り合い行動を適応的に決定/再計画する行動決定システム

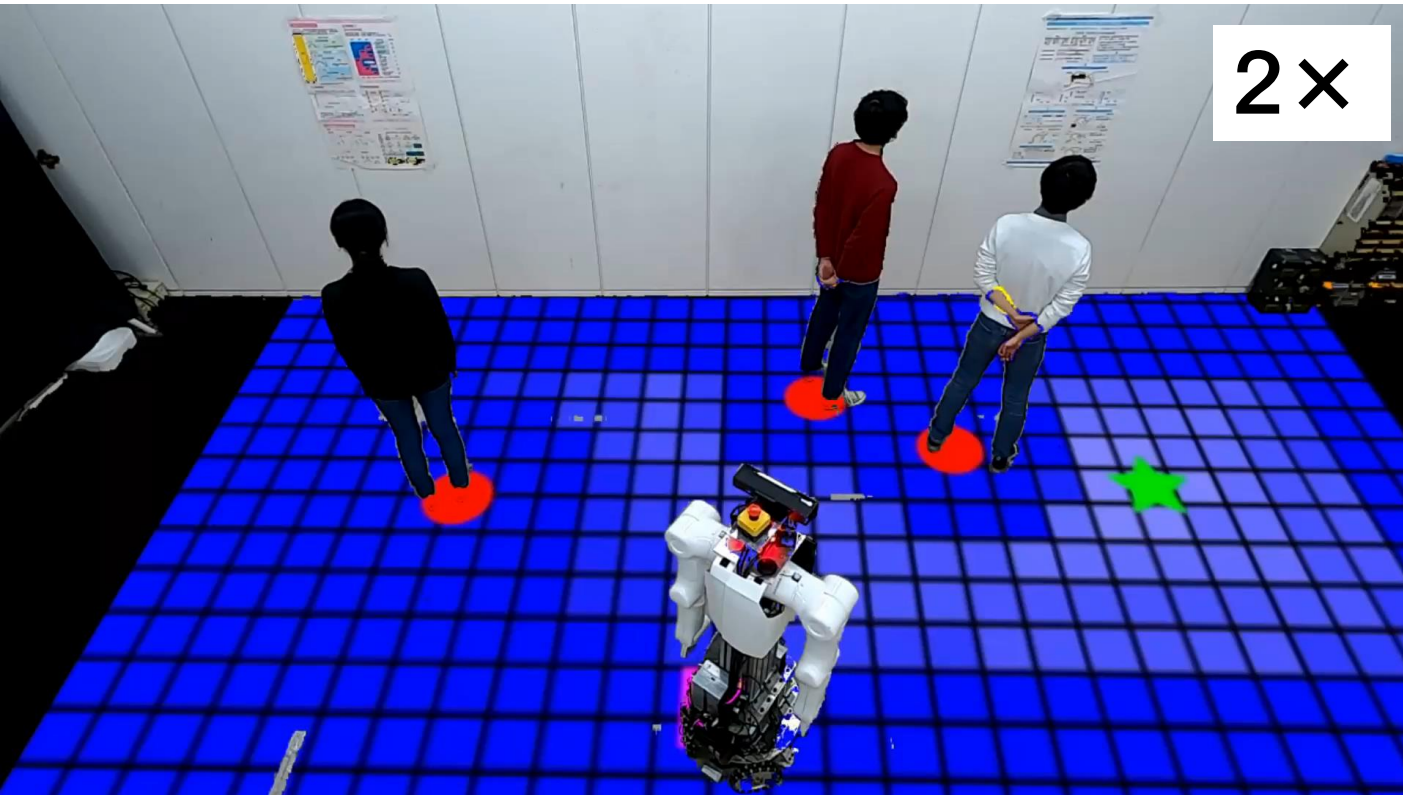
■ 要求仕様

- 協働者の行動意図の推定
 - 協働者が迂回・回避しようとしている、通行できる道が無いといったコンテキストを理解しつつ、行動変化に対して素早く目的地を推定可能な技術が求められる
- ロボットの主張的な協働譲り合い(プロアクティブ)と、協働者に同調する協働譲り合い(リアクティブ)の判断
- 周囲環境やロボットと協働者の状況を考慮した各行動の定量的評価

システム構成



Adaptive Goal Finder (AGF)

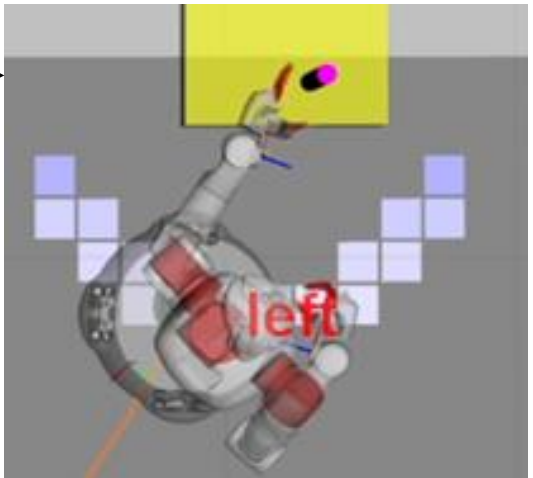


移動領域を
グリッドに分割し、
各グリッドのコストを
算出することで
最適なゴール位置・
軌道を探索する手法

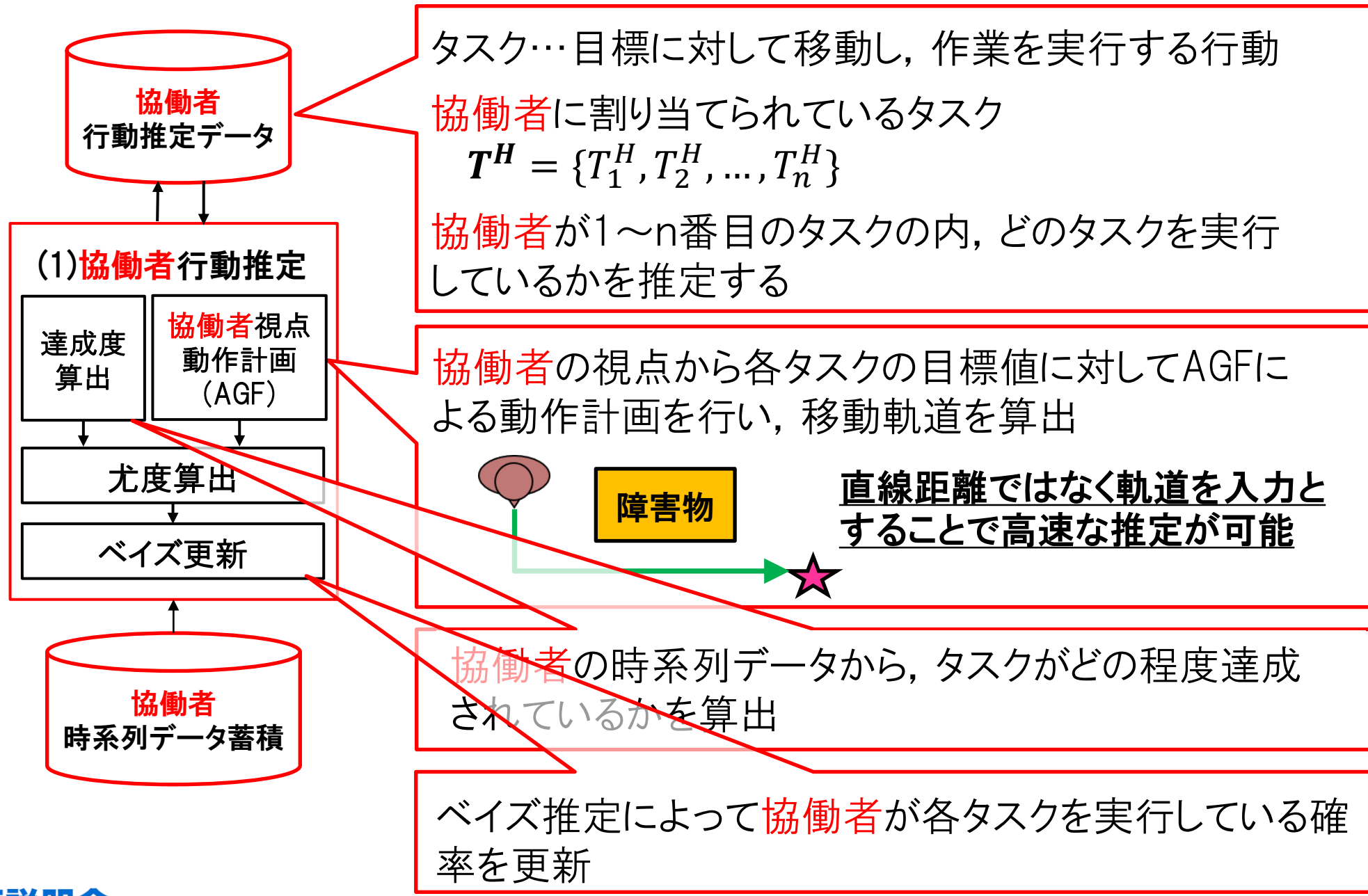
(櫻井、SI2021)



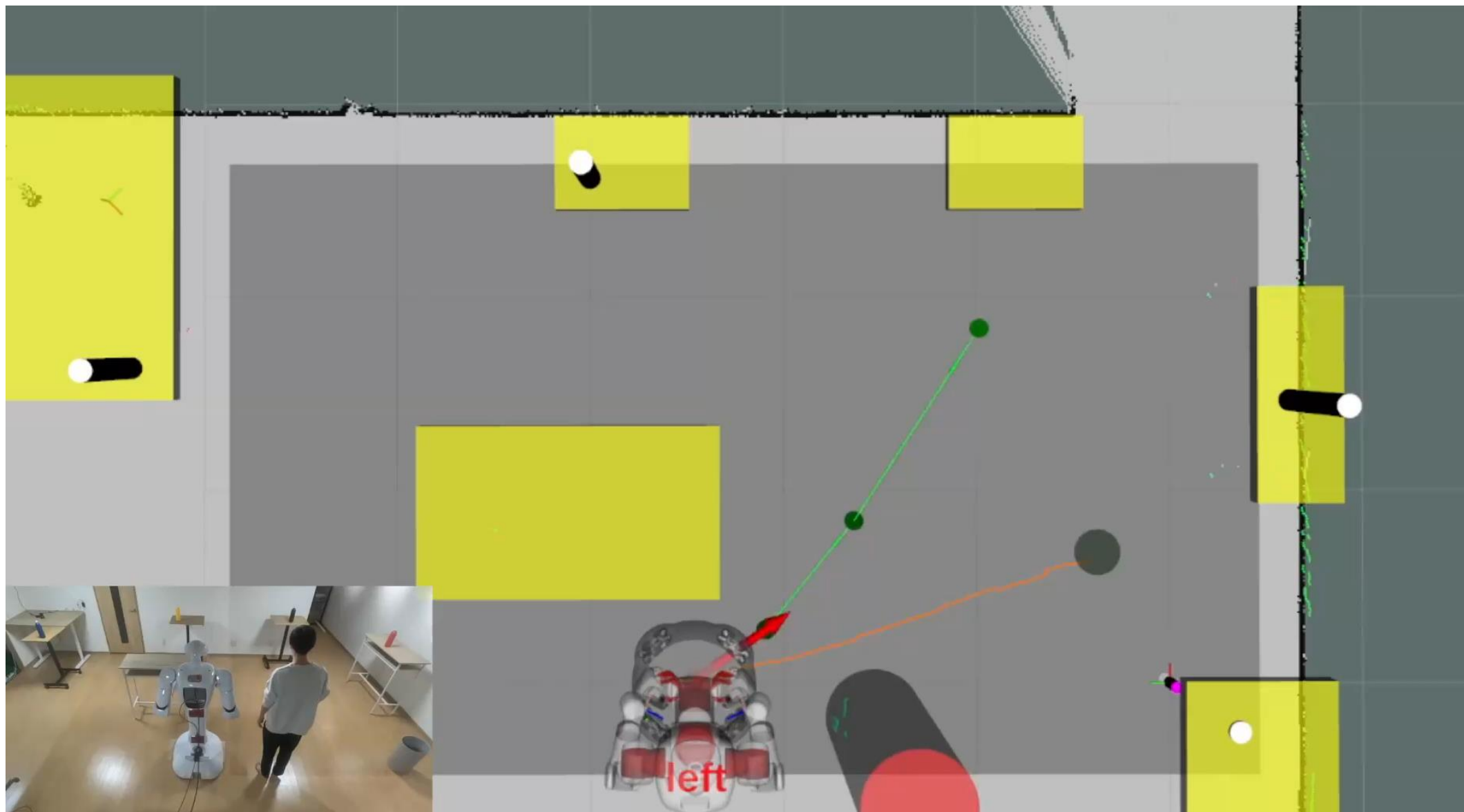
移動とマニピュレーション動作を同時に
計画できるようAGFを拡張した手法を使用



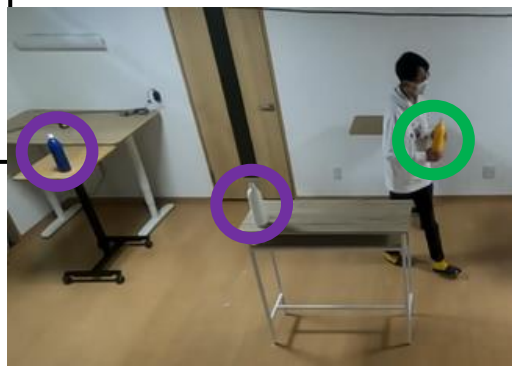
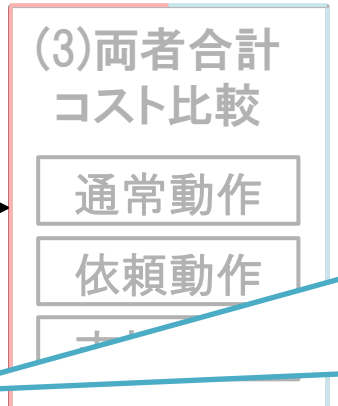
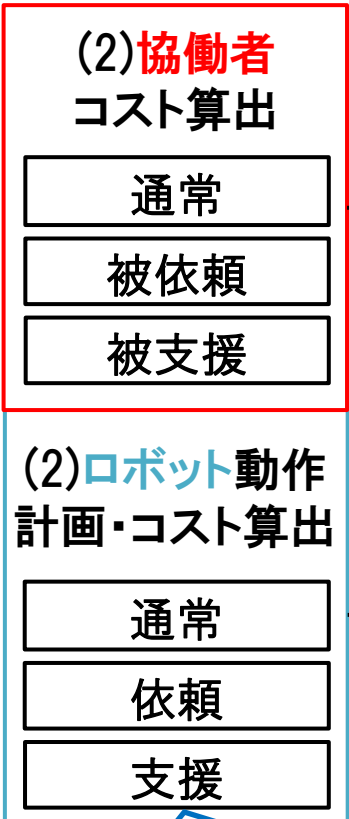
(1)協働者行動推定



協働者の実行タスク推定



(2) ロボット・協働者コスト算出



各行動選択肢に対して
ロボットと**協働者**の協働作業コストを算出

直近タスク…現在実行中のタスク
 AGFによって算出される動作時間

残存タスク…未達成の残りタスク
 概算距離 / 移動速度 + タスクの目安作業時間

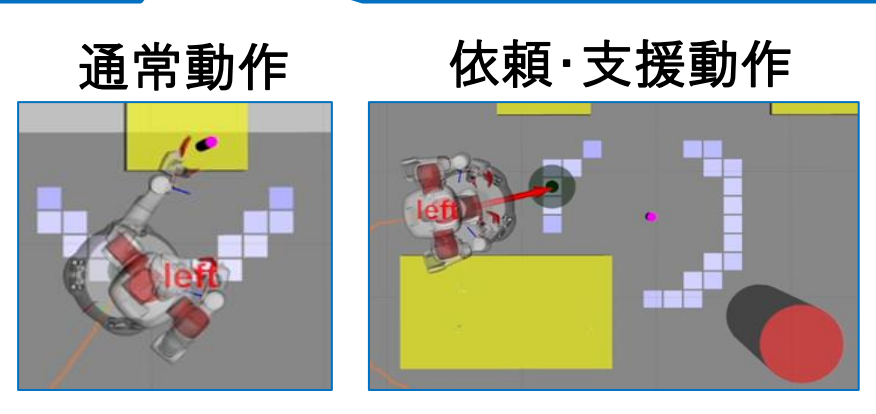
協働作業コスト
 直近タスクのコスト + 全残存タスクのコスト

ロボットと**協働者**の協働作業コストに対して
 それぞれ固有パラメータを掛け合わせる

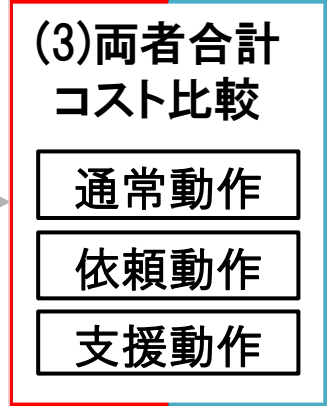
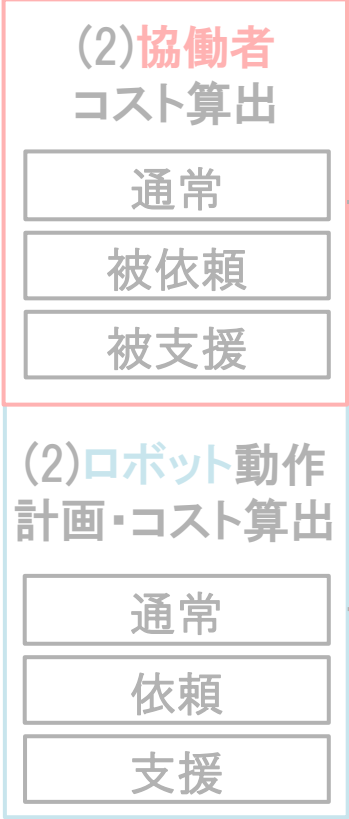
K^R : ロボットのパラメータ K^H : 協働者のパラメータ
 ロボット・協働者のコストの比重を調整する

本研究では、 $K^R = K^H = 1$ と設定

ロボット・協働者が平等になるよう設定



(3)両者合計コスト比較



k_{React} : **リアクティブ変数**
 通常は1だが、相手が主張した場合は、その主張に同調する行動選択肢を選ばせやすくする(< 1)

k_{Change} : **行動変化変数**
 通常は1だが、一度依頼・支援を選択した場合は、意思を簡単に変えないよう他の行動を選ばせにくくする(> 1)

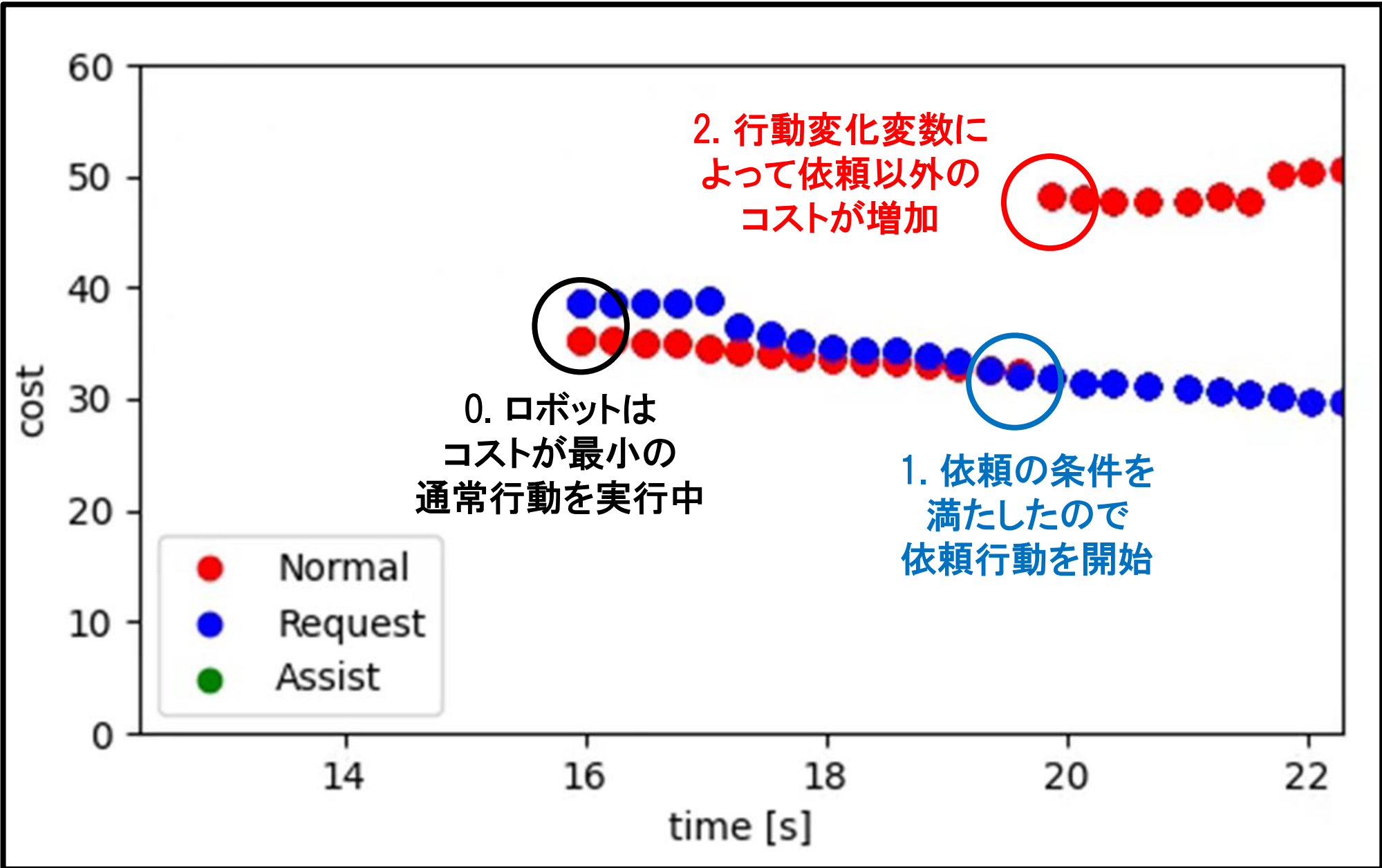
各行動の係数 K_{Nrml} , K_{Rqst} , K_{Asst} の係数に上記の変数を掛け合わせる

- **依頼条件**
 $\{K_{Rqst} (C_{Rqst}^H + C_{Rqst}^R) < K_{Nrml} (C_{Nrml}^H + C_{Nrml}^R)\} \cap \{(C_{Rqst}^R > C_{Rqst}^H) \cup (K_{Rqst} < 1)\}$
 - 依頼を選択することで、通常より合計コストが小さくなる場合
 - 相手とのコストの大小関係が変わらない場合(プロアクティブの場合)
- **支援条件**
 $\{K_{Asst} (C_{Asst}^H + C_{Asst}^R) < K_{Nrml} (C_{Nrml}^H + C_{Nrml}^R)\} \cap \{(C_{Asst}^H < C_{Asst}^R) \cup (K_{Asst} < 1)\}$
 - 支援を選択することで、通常より合計コストが小さくなる場合
 - 相手とのコストの大小関係が変わらない場合(プロアクティブの場合)
- **通常条件**
 otherwise
 - 依頼・支援どちらの条件も満たさない場合

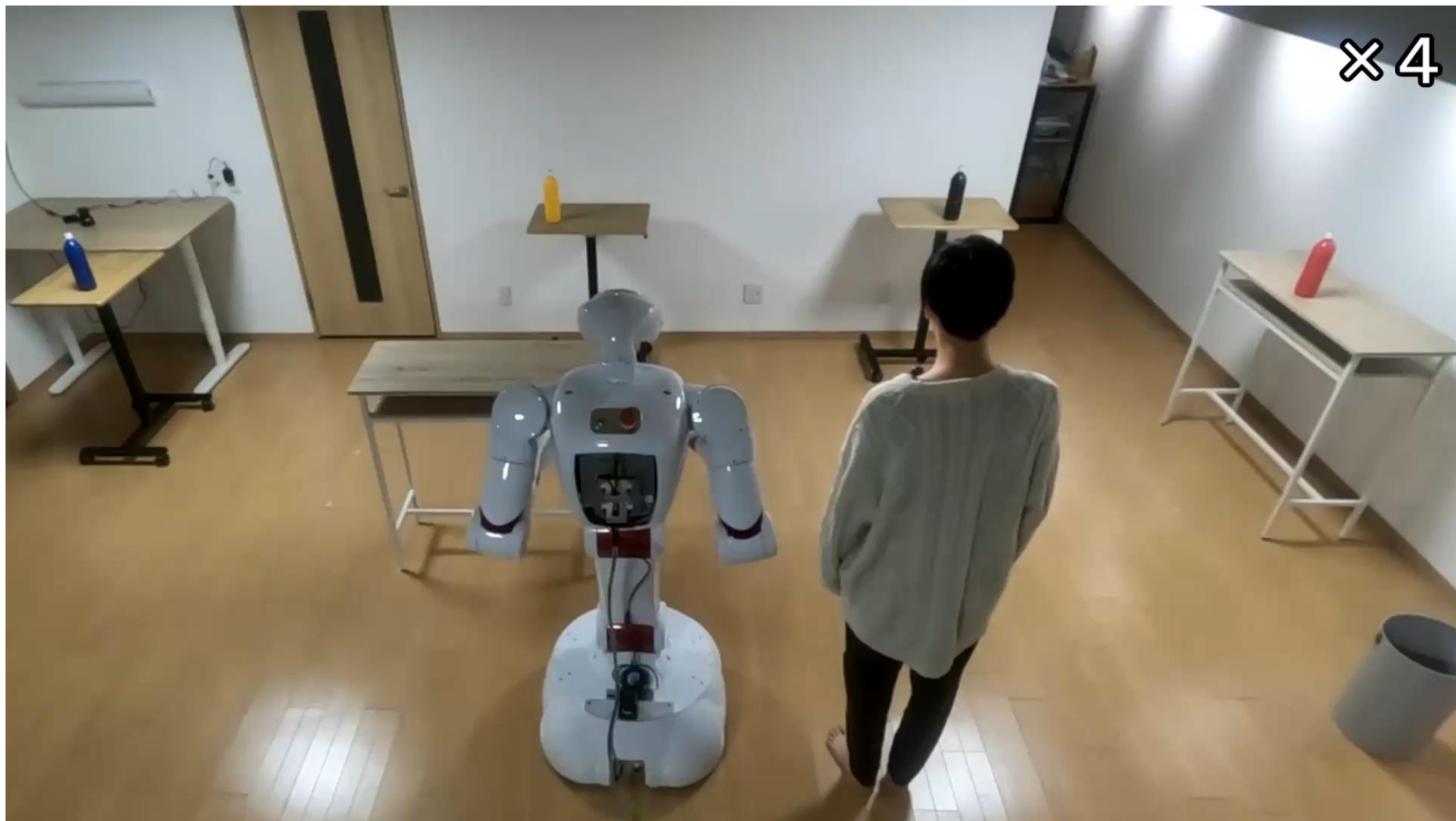
協働作業コスト

	ロボット	人
通常	C_{Nrml}^R	C_{Nrml}^H
依頼	C_{Rqst}^R	C_{Rqst}^H
支援	C_{Asst}^R	C_{Asst}^H

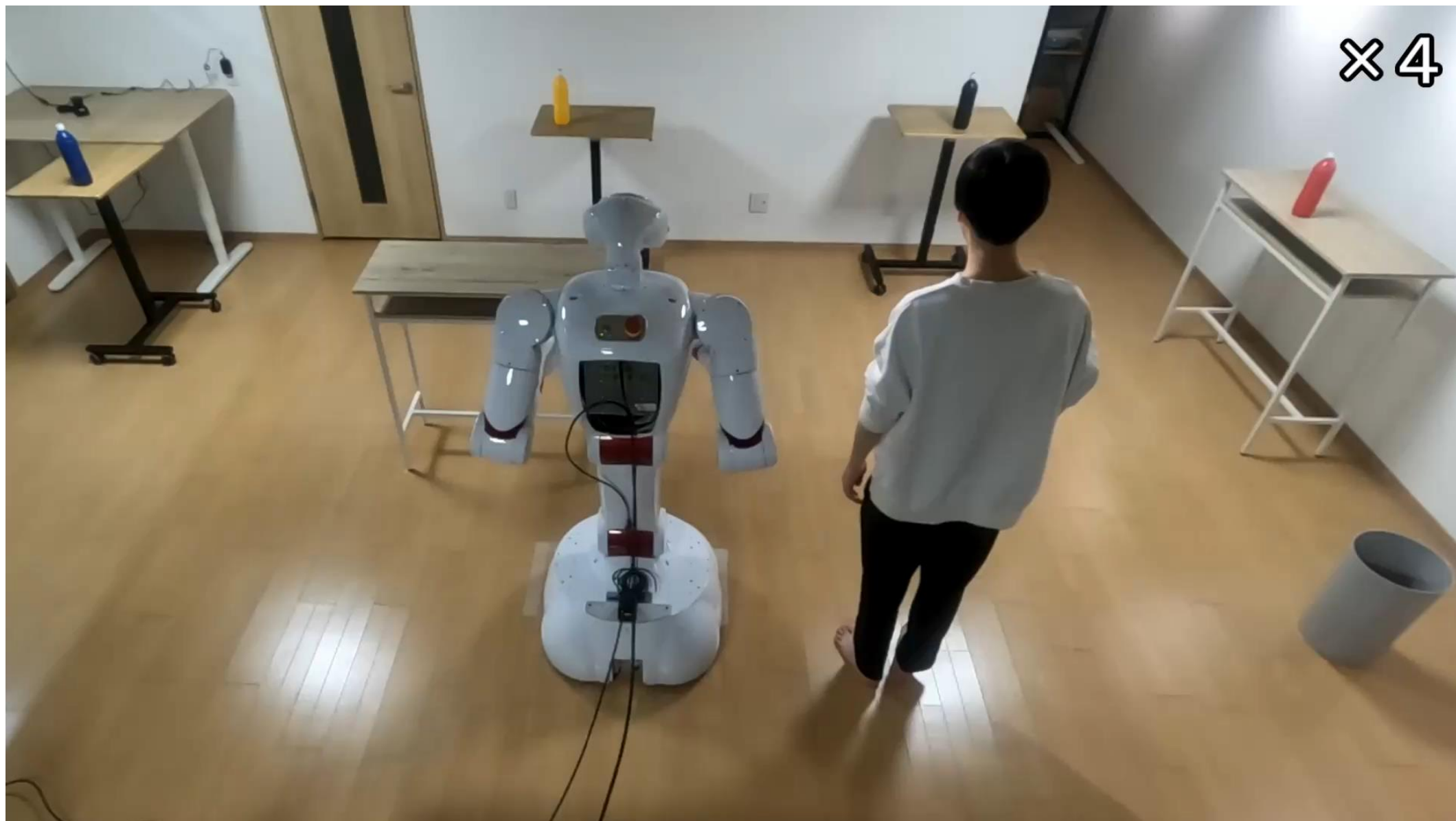
(3)両者合計コスト比較



依頼動作(プロアクティブ→リアクティブ)



支援動作(プロアクティブ→リアクティブ)



評価実験

提案システムを搭載したロボットと被験者が 机上の対象物をゴミ箱へ捨てる協働作業を行う実験を実施

■ 被験者

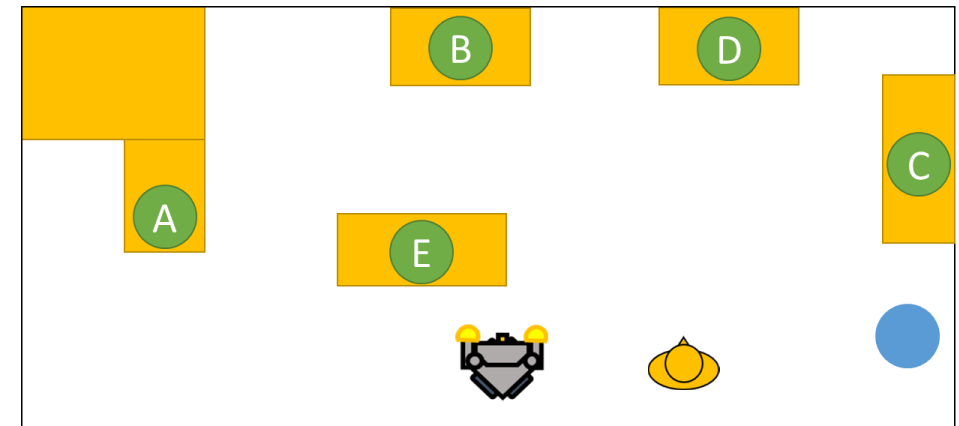
- ・ 4人

■ 評価項目

- ・ 依頼・支援, 主張・同調の回数
- ・ 全体作業時間
- ・ 心理アンケート評価(1~6段階)
 - 自然
 - 分かりやすい
 - 気が利く
 - 快適
 - 効率的

■ 被験者への指示

- ・ 対象物を捨てる順番は任意
- ・ 一度に把持可能な対象物は1つ
- ・ 条件2, 4では, メリットがあると感じた場合はロボットに依頼・支援を提案可能
- ・ ロボットが依頼・支援を提案した場合, 応じる動作と断る動作を選択可能

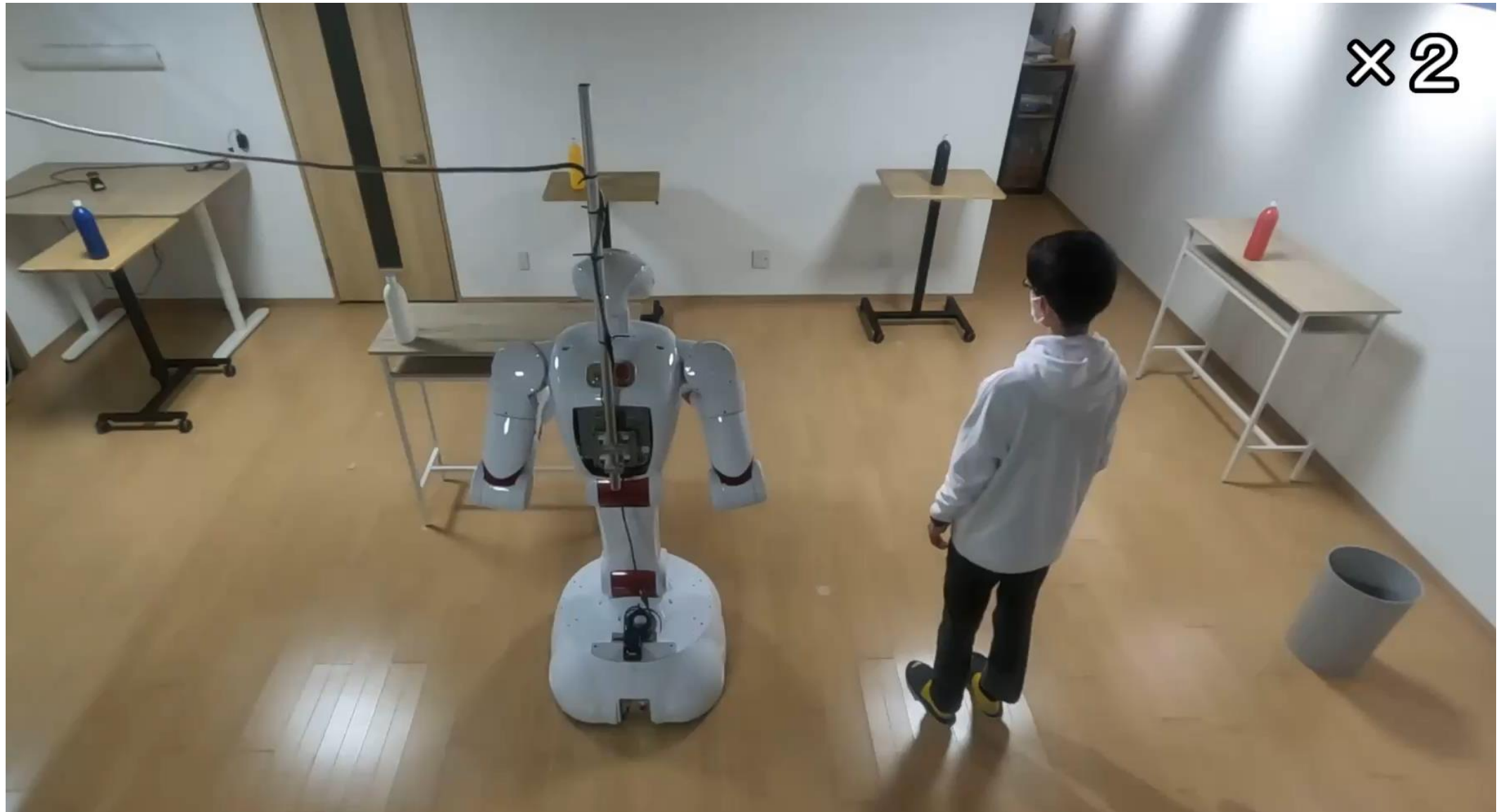


■ 机 ● ゴミ箱

条件	ロボットの 対象物	被験者の 対象物	協働 譲り合い
1	A→B→C	D	無
2	A→B→C	D	有
3	D	A, B, C, E	無
4	D	A, B, C, E	有

各条件を2セットずつ(計8セット)行う

実験の様子(条件4)



動作結果

条件	ロボット 個数	被験者 個数	協働 譲り合い	プロアク ティブ 依頼 合計回数	プロアク ティブ 支援 合計回数	リアクティブ 依頼 合計回数	リアクティブ 支援 合計回数	拒否 合計 回数	全体 作業 時間 平均
1	3	1	無						73.9
2	3	1	有	5	0	3	0	2	73.2
3	1	4	無						53.3
4	1	4	有	0	0	0	6	5	66.2

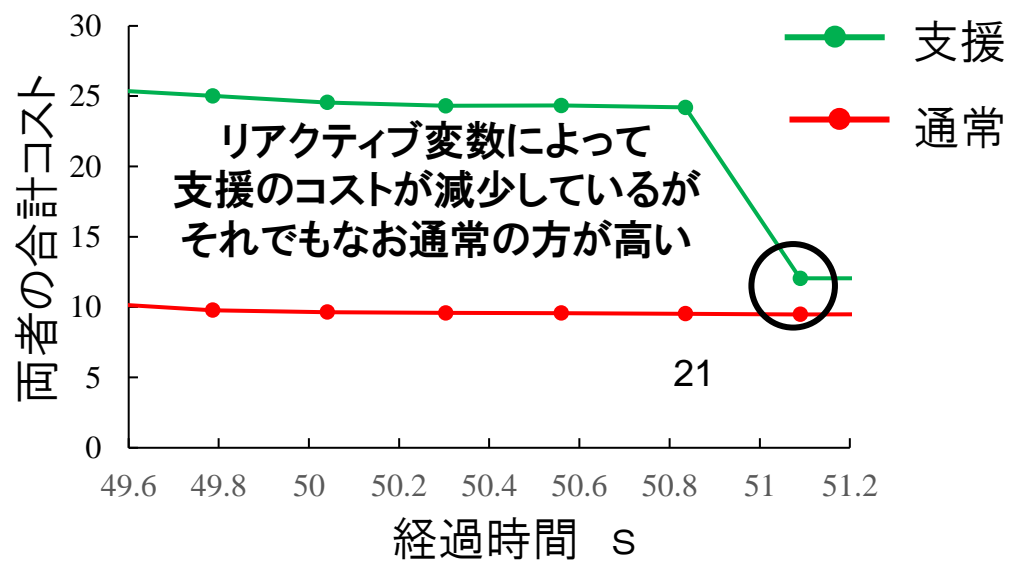


依頼・支援，プロアクティブ・リアクティブの使い分けが確認された

動作結果

条件	ロボット個数	被験者個数	協働譲り合い	プロアクティブ依頼合計回数	プロアクティブ支援合計回数	リアクティブ依頼合計回数	リアクティブ支援合計回数	拒否合計回数	全体作業時間平均
1	3	1	無						73.9
2	3	1	有	5	0	3	0	2	73.2
3	1	4	無						53.3
4	1	4	有	0	0	0	6	5	66.2

協働者の主張に対するロボットの主張



心理アンケート結果

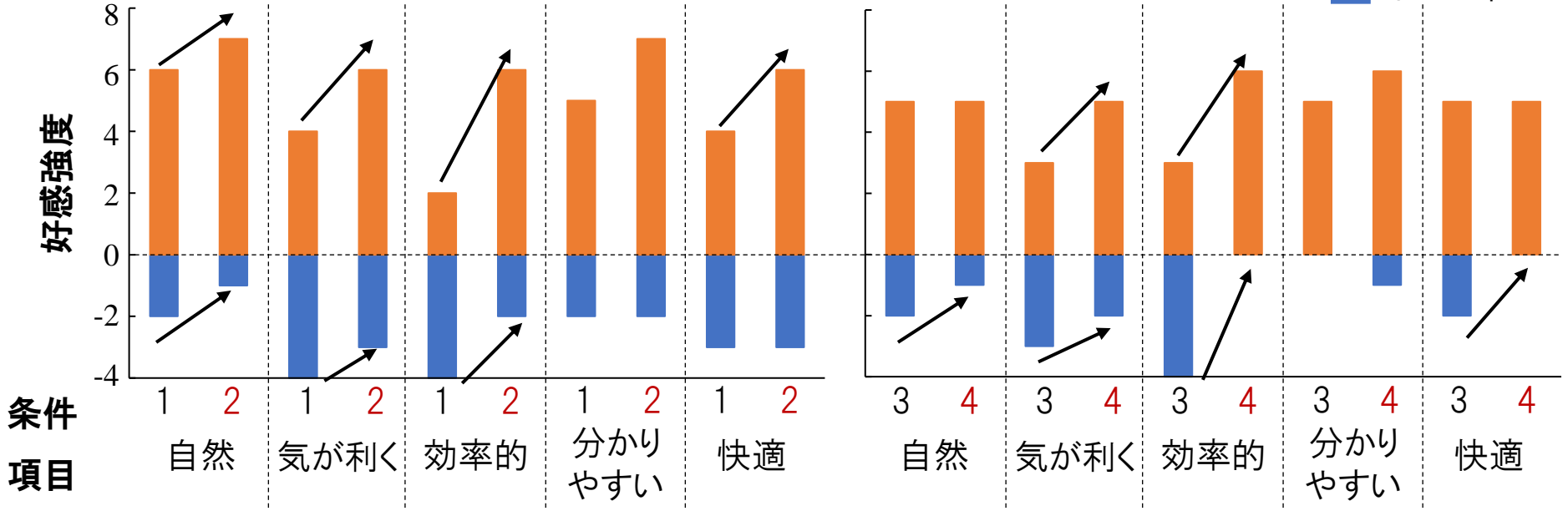
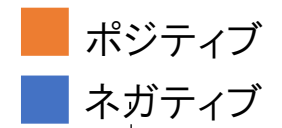
条件1—2, 3—4でより好ましいロボットの行動



	ロボット	被験者	協働譲り合い
条件1	3	1	無
条件2	3	1	有
条件3	1	4	無
条件4	1	4	有

条件1—2, 3—4での心理アンケートによる好感強度

ネガティブ(1~3)とポジティブ(4~6)それぞれの合計を**好感強度**と定義して算出



協働譲り合い行動を含むことで、ロボットは人により好まれる行動を選択し、**自然, 気が利く, 効率的, 快適の項目で心象が良くなる**ことが確認された

考察(アンケート)

■ なぜ提案システムを含む行動の方が効率的だと回答したのか

- タスクの量が分散されるから
- やりとりをしないと片方が何もしていない状態になる時間が長かったから

被験者は提案システムにおける両者の平等性を評価している

被験者は設定した判断基準の平等性を感じ取っていた

■ なぜロボットに対して依頼・支援を提案したのか

- ロボットと触れ合いたいと思ったから
- 一緒に作業をした方が楽しいから

被験者はロボットと
協調して作業しようとしていた

提案システムを受け入れて
使ってもらえたことが分かった



想定される用途・展開



人共存ロボット



パーソナル
モビリティ



自動車

人共存環境

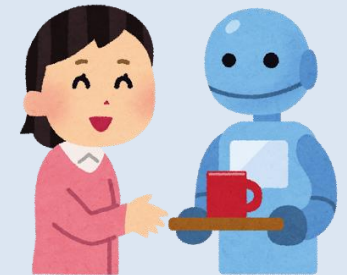
- 案内・荷物運搬(駅、ホテルなど)
- 介助・介護(個人宅、病院など)
- オフィス等での警備
- 生活支援全般

生産関連環境

- 土木・建築現場や工場内外での巡回モニタリングおよび部品・情報共有
- 倉庫内の物品搬送
- 部品のアセンブリ

公道・その他

- ラストワンマイルの物流
- 有事(災害時)の誘導・警備



実用化に向けた課題(タスク)

ベースとなる「協働譲り合い行動決定システム」は構築できたとみている。実用化には、**事業に特化した「周辺技術の実装」と「多様性への対処」**が課題(タスク)と捉えている。

■ 協働譲り合い行動の選択肢の拡張

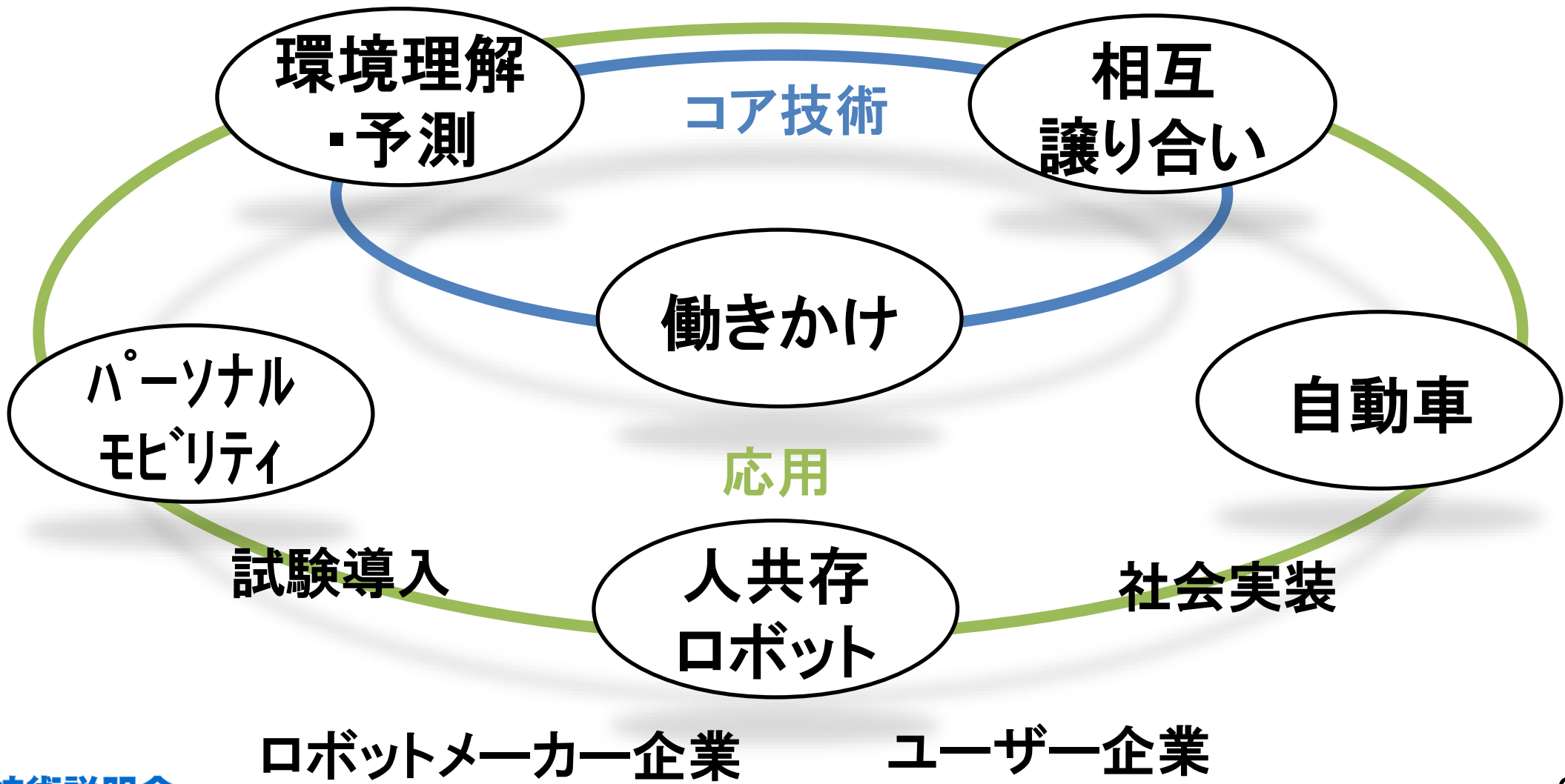
- 手渡しでなく机等においておく、相手の荷物を一緒に支える等の、より複雑な行動選択肢の動作計画・定量的評価技術の開発

■ コミュニケーション機能の拡充

- サービス展開に必要な、意思疎通を行うための顔や音声対話システム、データ連携等の機能の実装。

企業への期待

「協働譲り合い技術」に基づき、人とロボットの関係性を新たにデザインし、製品化に繋げたい



本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : ロボット、ロボットの行動決定システム、及びプログラム
- 出願番号 : 特願2023-77663
- 出願人 : 早稲田大学
- 発明者 : 亀崎允啓、三宅太文、他

その他6件

産学連携の経歴

- 2004年ー現在 これまでに、約17社と共同研究を実施(現在、4社と継続中)
- 2017年 JST・さきがけに採択
- 2019年 JST・社会還元加速プログラム(SCORE)に採択
- 2021年 JST・SBIRフェーズ1に採択

お問い合わせ先

早稲田大学

リサーチイノベーションセンター

知財・研究連携支援部門(承認TLO)

TEL 03-5286-9867

e-mail contact-tlo@list.waseda.jp