



動作が機械的な共同行為相手との動作共有体験による 社会的サイモン効果形成の検証

李 曉彤, 畑田 裕二, 峯 大典, 鳴海 拓志

東京大学 (〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1, {xiaotong, hatada, mine, narumi}@cyber.t.u-tokyo.ac.jp)

概要: プログラム制御のぎくしゃくした動作や事前記録した人間の動作など, 機械的に振る舞う他者との共同行為では, 他者の動作の感覚運動情報を知覚できず, その動作を行動計画に組み込んで協調を成す結果として生じる社会的サイモン効果が生じにくい. これに対し, 本研究では参加者が加重平均した自他の動作に含まれる他者の動作を, 自分の運動制御の内部モデルに組み込むことにより, その動作の感覚運動情報を知覚できる特性を活かし, 社会的サイモン効果の形成を目指す. その結果, 他者の動作がプログラム制御であった場合, 社会的サイモン効果が形成された. 一方で, 他者の動作が事前記録であった場合, 動作共有経験後に自己および他者の両方の動作に対する感覚運動情報の知覚が低下し, 社会的サイモン効果は形成されなかった.

キーワード: 社会的サイモン効果, intentional binding, 共同行為, アバタ

1. はじめに

我々は共通目標を達成するために他者と空間的・時間的に行動を調整し, 環境に変化をもたらす共同行為を日常的に遂行する. 共同行為を円滑に遂行するためには, 他者の行動を手がかりとして自己の行動計画を構築する必要がある. 例えば, 二人でソファを運ぶ際には, 歩幅や歩行速度が自然に調整され, 両者の動作が同期していく. このような過程は, 「行為/課題共同表象 (action/task co-representation)」と呼ばれる心理学的現象によって説明される. 課題共同表象とは, 個体が他者の身体動作およびその目標を心的に表象し, それを自己の行動計画に統合する認知プロセスを指す. これは, 共同行為において構成員の心的状態が個体レベルに還元できない集合的な心的表象を共有しているより高次の哲学的概念「we-mode」の基盤となる. 課題共同表象が形成されているかを検証する方法としては, 視覚や聴覚による刺激 (Stimulus) とそれに対する反応行動 (Response) の空間位置が一致しているかどうか (S-R compatibility) が反応速度に影響する社会的サイモン効果 (Social Simon Effect; SSE) の計測が用いられる [1].

人間がロボット, 自動運転車, AI といった機械とのインタラクションを日常的に行うようになった現代社会において, ヒューマン・マシン・インタラクションを支援することは重要な課題である. 先行研究では, SSE は人間同士の共同行為において生起することが知られている. 一方で, 他者が機械である場合, あるいは非生物的な身体表象 (物理的な外見や動作の運動学的規則など) に基づいて, 他者が機械として知覚される場合, SSE は生起しない. 例えば, 他者の外見がコンピュータやヒューマノイドロボットなどとして提示された場合, SSE が生起しないことが報告されている. さらに研究 [2] では, SSE が生起しないこと (心的レベルでの協調

の欠如) が, Intentional Binding (IB) 効果の低下 (感覚運動レベルでの協調の欠如) と関連することが明らかにされた. IB 効果は, 行為とその結果との時間間隔が実際よりも短く知覚される現象を指し, その生起には感覚運動情報に基づく予測的プロセスが関与している. IB は, 感覚運動情報への知覚が可能かつ結果の予測が可能な行為, 例えば自分の行った行為や, 自己の運動モデルに統合可能な他者の意図的行為に対してのみ生起するとされている.

著者らによる先行研究 [3] では, 他者の非生物的な外見に加え, プログラム制御や事前記録など, バーチャル環境における他者の機械的な動作も SSE の生起に阻害するが示されている. さらに, 他者の行為に対する IB の低下が観察された. 本研究では, 機械的な動作をする他者との共同行為における SSE の形成を目指し, その手段として動作共有システムを導入した. このシステムにおいては, 参加者のセルフアバタと他者アバタの動作が加重平均され, その結果が両者のアバタに同時に反映される. 観察された相手の動作に対する意図や結果の理解が, 自己の運動経験に基づいていることが知られている. したがって, 人間には再現不可能な機械的な動作に対しては, IB は生起しにくい. 一方で, 動作共有によって他者の機械的な動作の一部が参加者の動作に組み込まれることで, その動作の感覚運動情報への知覚が可能となり, 内部運動モデルの更新が促進される可能性がある. これにより, 参加者は他者の動作をより理解・予測しやすくなり, IB の形成が支援されると考えられる. さらに, 参加者は動作共有における自己の貢献を過大評価し, 自身が行為を主導していると認識する傾向があるため, 動作共有時のセルフアバタの動作に対する IB は低下せず, 同期した自他の動作によって, IB が他者のアバタの動作にまで拡張される可能性がある. 以上より, 本研究では, 先行研究において SSE が形成されないと

された動作が機械的な他者との共同行為において、動作共有体験を通じて他者の動作に対する IB の知覚および SSE の形成が促進されることが期待される。

2. 実験

2.1 実験条件

本実験では、バーチャル環境における 2 種類の他者アバタを参加者間要因として操作した。ロボット（ぎくしゃく）条件では、他者はロボットアバタとして表象され、動作はプログラム制御された一定の関節速度で直線的に移動するぎくしゃくなものであった。ヒト（プレレコ）条件では、他者はヒトアバタとして表象され、動作は事前に記録された滑らかな人間の動作が再生されるものであった。いずれの条件においても、参加者のセルフアバタはヒトアバタに固定され、その動作は HMD(Meta Quest 2) およびハンドコントローラによって 3 点トラッキングされた。性別による影響を統制するために、参加者自身および他者のヒトアバタの性別は、参加者の生物学的性別と一致させた。アバタの外見を図 1 に示す。



図 1: アバタの外見: ヒト男性, ヒト女性, ロボット

2.2 実験参加者

SNS を通じて右利きで健康な参加者 40 名を募集し、20 名（年齢: 33.25 ± 11.77 性別: 女性 12 名）をロボット（ぎくしゃく）条件に、20 名（年齢: 35.20 ± 11.36 性別: 女性 10 名）をヒト（プレレコ）条件に割り当てた。

2.3 タスクと動作共有の設計

各条件において、参加者は物体運搬タスクおよび共同サイモン-意図性の結合タスク (jS-IB タスク) を、参加者ソロ、他者ソロ、動作共有を伴うペア共同の 3 つの協力関係で実施した。これらのタスクの設計は、筆者らの先行研究 [3] を参照した。参加者ソロと他者ソロ条件において、物体運搬タスクは参加者自身と他者のアバタの外見および動作の表象を確認することを目的として実施した。一方、ペア共同条件においては、物体運搬タスクは動作共有体験を通じて他者の感覚運動情報への知覚を可能にし、協力関係の形成を促進することを目的とした。物体運搬タスクに続く jS-IB タスクは、社会的サイモン効果および IB 効果を測定するために設計された。ソロ条件で取得したベースライン効果と共同条件における効果が比較された。協力関係の形成および他者の感覚運動情報の知覚が後続の条件に影響を及ぼす可能性を統制するために、ペア共同条件は常に最後に実施するように固定し、参加者ソロと他者ソロ条件の順番はカウンターバランスを取って調整した（参加者ソロ→他者ソロ→ペア共同、または他者ソロ→参加者ソロ→ペア共同）。

物体運搬タスクにおいては、テーブルの左側・中央・右側

に赤い枠が配置された。タスク中、バーチャルキューブは 1 つの枠から生成され、アバタの手で触れることで手に付着し、別の枠まで運搬すると手から離れるように設計されていた。参加者ソロ条件では、参加者はテーブル右側に着席し、中央の枠から右側の枠へとキューブを自ら運搬する必要があるが、他者は存在しなかった。参加者には、左右の手を交互に用いて運搬するよう指示された（例：左手→右手→左手）。他者ソロ条件では、他者がテーブル左側に着席し、左側の枠から中央の枠へとキューブを左右の手で交互に運搬し、参加者はその様子を観察するのみであった。ペア共同条件では、動作共有（図 2 左）が導入された。両者の左手および右手の身体に対する相対位置と回転は 50:50 の比率で加重平均され、両者のアバタに反映された。動作共有の結果、参加者または他者の動作が両者のアバタに同時に反映され、両者のアバタは同期的に動作した。この動作共有のもと、参加者と他者は協調して物体運搬タスクを遂行した（図 2 右）。具体的には、他者のアバタ（共有された左手）によってキューブが左側から中央へ運ばれ、その後、参加者のアバタ（共有された右手）によって中央から右側へと運ばれた。ロボット他者およびヒト他者の物体運搬効率、1 回の運搬に要する時間を約 3 秒に統一した。なお、ペア共同条件における他者の動作は、他者ソロ条件において使用されたものと同一であった。

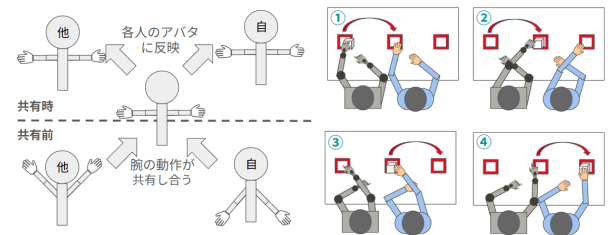


図 2: 動作共有と物体運搬タスク (ペア共同)

jS-IB タスク（図 3）においては、テーブル中央にタブレットが設置され、各試行の開始時には白い十字が表示された。十字表示から 700 ミリ秒後に、赤丸または緑丸が画面の左右いずれかに提示された。丸の位置に関係なく、参加者または他者に事前に割り当てられた色の丸が提示された場合、該当する者はできるだけ早くボタンを押して反応するよう求められた。参加者は実環境のテーブル上に設置されたキーパッドを使用して反応した。他者の反応動作はプログラムで制御され、反応時間は 450~650 ミリ秒であった。1700 ミリ秒以内に反応が検出された場合、反応行為が実行された合図として、十字の周囲に白い四角が表示された。その後、400, 900, または 1400 ミリ秒の時間間隔において、効果音（500 Hz の純音、0.2 秒）が提示された。参加者はこの音を聴いた後、四角が表示されてから音が鳴るまでの時間間隔を推測し、4 秒以内に口頭で報告するよう求められた。なお、参加者ソロ条件における他者の担当試行や、他者ソロ条件における参加者の担当試行など、反応が行われなかった場合には、白い四角も効果音も提示されなかった。各試行の終了後、画面は黒くなり、1000 ミリ秒の間隔を経て次の試行が開始された。

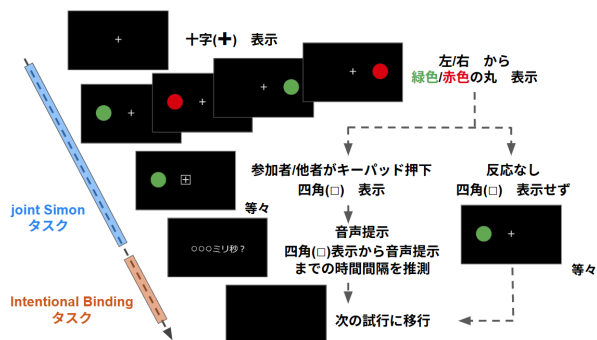


図 3: jS-IB タスクの一試行の流れ

2.4 アンケート

実験では、Virtual Embodiment Questionnaire (VEQ) を用いて、参加者がセルフアバタに対して抱く身体化感覚 (Embodiment) を、アバタを所有する感覚 (Body ownership)、アバタを制御する感覚 (Agency)、およびアバタへの身体化によって身体スキーマが変化する感覚 (Change) の3つの側面から評価した。さらに、社会的サイモン効果に関連するとされる社会的存在感を、他者と同じ環境にいる感覚 (Co-presence) と他者に注意を向けている感覚 (Attentional Engagement) の2つの側面から評価した。加えて、Human - Robot Interaction Evaluation Scale (HRIES) のうち、動作の意図性 (Intentionality) および外見の人らしさ (Animacy) で、参加者が他者のアバタをどの程度人間的な存在として認知したかを評価した。すべての質問項目は、7段階リッカート尺度 (1: 全く感じなかった, 7: 強く感じた) で評価された。

2.5 実験の流れ

参加者は、バーチャル環境に没入した後、目の前に現れた全身鏡を通じて、セルフアバタの外見および動作を 60 秒間確認した。その後のチュートリアルでは、参加者はソロで 8 試行の jS タスク、20 試行の IB タスク、12 試行の jS-IB タスクを完遂した。jS タスクでは、jS-IB タスクに含まれる音提示および時間間隔推定は実施されなかった。IB タスクでは赤丸・緑丸は提示されず、十字が出現した後、参加者は任意のタイミングでボタンを押して反応するよう指示された。反応すると合図として十字の周りに四角が現れ、200~2000 ミリ秒の範囲でランダムに設定された時間間隔を経て音が提示された。参加者はその間隔を推測して口頭で報告した後、正しい時間間隔が画面に表示された。IB タスクは、反応行為実施の合図 (四角表示) と音提示を結びつけ、時間間隔推定に必要な体内時計をキャリブレーションすることを目的として行った。すべてのチュートリアルが終了した後、参加者は VEQ に回答した。jS タスクおよび jS-IB タスクのチュートリアルは、実験の最初に一度だけ実施された。一方で、体内時計を再キャリブレーションするため、IB タスクのチュートリアルは協力関係 (参加者ソロ/他者ソロ/ペア共同) の条件が切り替わるたびに繰り返し実施された。

物体運搬タスクはチュートリアルに続いて実施された。参加者ソロ条件と他者ソロ条件において、タスクの実施時間は 60 秒であった。ペア共同条件では、動作共有への不慣れを配

慮して 30 秒を追加し、計 90 秒間実施された。物体運搬タスク終了後、jS-IB タスクが行われた。赤色と緑色の 2 種類の丸が、参加者と他者に事前にそれぞれ割り当てられた (例: 参加者→赤丸/他者→緑丸、または逆)。jS-IB タスクは 2 セッションがあり、各セッションは 60 試行で構成された: 二つの刺激 - 反応空間一致性 (一致/不一致) × 2 種類の丸 (赤丸/緑丸) × 三つの時間間隔 (400 ミリ秒/ 900 ミリ秒/ 1400 ミリ秒) × 5 回の繰り返し。各セッションの間には 4 分間の休憩、そして jS-IB タスク終了後には 6 分間の休憩が設けられた。

IB タスクのチュートリアル、物体運搬タスク、jS-IB タスクは、参加者と他者の協力関係が異なる条件において再実施された。他者が参加する条件 (他者ソロとペア共同) の終了後には、参加者は社会的存在感のアンケートおよび HRIES に回答した。すべての実験が終了した後、参加者に対してインタビューが実施された。

3. 実験結果

3.1 アンケート

VEQ の Body Ownership, Agency, Change のスコアについて、Wilcoxon rank sum 検定を用いて、2 つの他者条件に割り当てられた参加者群間の差を検定した。その結果、いずれのスコアにおいても有意差は認められなかった ($p > .10$)。社会的存在感および HRIES に関しては、各他者条件における協力関係 (他者ソロ/ペア共同) の影響、および各協力関係条件における他者の種類 (ロボット/ヒト) の影響を評価するため、Wilcoxon rank sum 検定を実施した。協力関係による影響に関しては、ヒト (プレレコ) 条件において、ペア共同時の Co-presence ($p = .0157$) および Attentional Engagement ($p = .0165$) が、他者ソロ時より有意に低下した。一方、他者の種類による影響に関しては、他者ソロ条件において、ロボット (ぎくしゃく) よりもヒト (プレレコ) の方が Co-presence が高まる有意傾向が観察された ($p = .054$)。また、ペア共同条件においては、ヒト (プレレコ) の方が Animacy が高まる有意傾向が観察された ($p = .071$)。

3.2 SSE

SSE の生起は、刺激 - 反応が空間一致より不一致の場合に反応時間が有意に短くなることによって示される。Shapiro-Wilk test により反応時間データの正規性が確認されたため、各他者条件 (ロボット/ヒト) における各協力関係 (参加者ソロ/ペア共同) について、一致条件および不一致条件における反応時間の差に対して paired samples t-test を実施した。結果は図 4 左に示す。ロボット (ぎくしゃく) 条件においては、参加者ソロ時の SSE は確認されなかった ($p > .10$)。一方、ペア共同時には SSE が確認された ($p = .018$)。ヒト (プレレコ) 条件においては、参加者ソロ時およびペア共同時のいずれにおいても SSE は確認されなかった ($p > .10$)。

3.3 IB

IB スコアは、推定された時間間隔と実際の時間間隔の差 (推定 - 実際) として算出され、スコアが低いほど IB 効

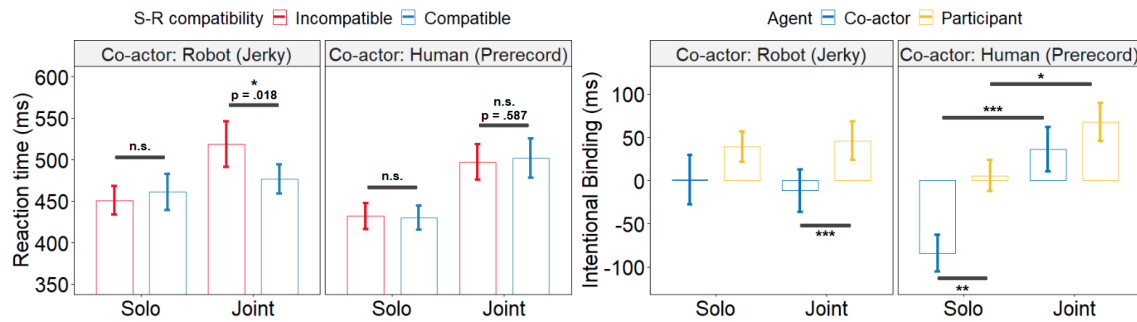


図 4: 左: SSE の結果 右: IB の結果 エラーバーは標準誤差を表す

果が強いことを示す。各他者条件（ロボット／ヒト）において、協力関係（ソロ／ペア共同）およびエージェント（他者／参加者）の効果をそれぞれ paired samples t-test で検定した。結果は図 4 右に示す。協力関係による効果に関しては、ロボット（ぎくしゃく）条件において有意差は認められなかった。ヒト（プレレコ）条件においては、ペア共同時の他者 ($p < .001$) および参加者 ($p = .038$) の IB スコアは、ソロ時と比較して有意に低かった。エージェントによる効果に関しては、ペア共同時のロボット（ぎくしゃく）他者の IB スコア ($p < .001$) およびソロ時のヒト（プレレコ）他者の IB スコア ($p = .007$) が、いずれも参加者自身の IB スコアと比較して有意に低かった。

4. 考察

ロボット（ぎくしゃく）条件に対しては、動作共有を経験するペア共同条件において SSE が観察された。インタビューにおいて、複数の参加者は、動作共有中にロボットを自分に従属する存在として捉え、その動作を強引に制御しようとしたと述べた。また、ロボットとの一体感を感じ、自己の身体表象をロボットとして知覚したとの報告もあった。他者がロボットであるという認識は、参加者にその動作を自らが主導するものとして捉えさせ、ロボットの動作を自己の内部モデルへと統合することにつながった。この過程により、参加者は他者の感覚運動情報を知覚し、それに基づく予測を行うようになったと考えられる。この予測プロセスの成立は、ペア共同条件においてロボット他者の動作に対する IB が高まった要因であり、それが SSE の生起を促進した可能性がある。

ヒト（プレレコ）条件に対しては、SSE は観察されなかった。ペア共同条件において、ヒト他者の社会的存在感は他者ソロ時より有意に低下したものの、ロボットソロ時との間には有意差が認められなかった。したがって、社会的存在感の低下のみをもって SSE が生起しなかった理由を説明することはできない。IB の結果からは、ヒトアバタとの動作共有後に、参加者自身および他者の行為に対する IB が有意に低下しており、これが SSE の欠如に関与している可能性が示唆される。共同行為において、参加者が他者の動作に応じて反応するフォロワーの立場にある場合、自己の行為および他者の行為のいずれに対しても IB が生起しないことが報告されている。このように、両者が共通目標の達成を志向する意図

を欠く状況では、行為とその結果との因果関係が不明瞭となり、フォロワーの追従的な行為や、リーダーの目標が曖昧な行為に対しては IB が生じにくくなる。もう一つの可能な解釈として、ヒトアバタの事前に記録された動作が参加者の動作に応じて調整されないという、機械的な側面が挙げられる。このような動作を動作共有によって参加者の動作に反映しても、他者の動作への理解が促進されない可能性がある。加えて、この非協調的な動作を参加者のセルフアバタの身体動作に組み込むことにより、協調して物体を運搬するという動作目標と、実際の非協調的な動作結果との乖離が生じ、参加者の内部モデルにおける感覚運動に基づく予測を乱す可能性がある。その結果として、IB の低下が生じると考えられる。その他、他者ソロ条件では、ヒト他者の動作に対する高い IB が観察された。これはヒト他者の事前に記録された人間の滑らかな動作が、参加者の運動経験に基づく予測可能であったためであると考えられる（この効果は動作がぎくしゃくなロボット他者には見られなかった）。しかし、この効果はペア共同条件におけるインタラクションおよび協調の欠如によって阻害された可能性がある。

謝辞 本研究の一部は、JST ムーンショット型研究開発事業 (JPMJMS2013)、科研費基盤研究 (A)(24H00706)、JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム (JPMJSP2108) の支援を受けて行われた。

参考文献

- [1] N. Sebanz, G. Knoblich and W. Prinz: Joint action: Representing others' actions: Just like one's own?, *Cognition*, Vol. 88, No. 3, pp. 11–21, 2003.
- [2] A. Sahaï, A. Desantis, O. Grynspan, E. Pacherie and B. Berberian, : Action co-representation and the sense of agency during a joint Simon task: Comparing human and machine co-agents, *Consciousness and Cognition*, Vol. 67, pp. 44–55, 2019.
- [3] 李曉彤, 畑田裕二, 鳴海拓志: ロボットアバタとの共同行為における外見の一致が社会的サイモン効果と自他の行為主体感の生起に与える影響, 第 29 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2024.