



融合身体における意思決定過程とリーダーシップの動態

橋浦健太^{1,2)}, 高田一真^{1,3)}, 萩原隆義¹⁾, 脇坂崇平¹⁾, 南澤孝太¹⁾

1) 慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科

(〒 223-8526 横浜市港北区日吉 4-1-1, {hagiwara, wakisaka, kouta}@kmd.keio.ac.jp)

2) 東京大学大学院学際情報学府 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, k.hashiuira@cyber.t.u-tokyo.ac.jp)

3) 沖縄科学技術大学院大学 (〒 904-0412 沖縄県国頭郡恩納村谷茶 1919-1, k.takada@oist.jp)

概要: 2人で1つのアバターを操作する融合身体では、参加者が協力することで認知負荷を分散させ、1人で操作することが難しい動きの達成や運動学習の促進が図られている。先行研究では、2人の参加者が“協力”して課題を達成しており、2人が協力しながらも“競合”が発生する課題についてはほとんど調べられてこなかった。そこで本研究では、2人が部分的に競合する意思決定過程を含むリーチング課題を実施し、参加者が競合をどのように解決するのか調査した。その結果、運動全体をリードするリーダーの意思が常に採用されるわけではなく、状況によってフォロワーの意思が組み込まれた。

キーワード: 融合身体, リーダーフォロワー, 意思決定

1. 序論

複数人で1つの対象を操作する共同行為は、1人で取り組むよりも操作パフォーマンスが向上し [1], さらに取り組む人数が増えることで、軌道が安定することが明らかにされている [2]。一方で、これらの実験では明確なリーチングターゲットが設定されており、参加者全員の意思が揃うように設計されていた。そのため、それぞれの参加者が互いの操作意図を考慮することなく操作を行うことが可能だった。

これらの実験条件は参加者らが事前に共通の表象を形成できていない状態でどのように操作を行うのかわからない。これまでの研究では、運動を主導するリーダー（追従する人はフォロワーとする）が進路を決定するとされており [3], またリーダー側だけに視認することができる障害物を設置するとフォロワーの人は見えないにも関わらず適応的に行動することが知られている [4]。

本研究では、2人が競合する状況において、どのように解決を行うのか明らかにするために、2人が部分的に競合する意思決定過程を含むリーチング課題を実施した。

本研究の貢献は以下の部分にある。

- 融合状態では、単独で運動する場合（ソロ）とは異なる選好をもつ参加者が存在する。
- 意思決定が明示的に存在する状況では、全体の運動量が少ない参加者（フォロワー）でも、一時的に運動量を増加させることで自身の意思を集団の意思に反映させることがある。

2. 実験

2.1 実験装置

本実験では、2人が1つのロボットアームを操作することができる Collaborative Avatar[5]を用いた。Collaborative Avatar は加重平均型の融合身体であり、2人の右手の甲に

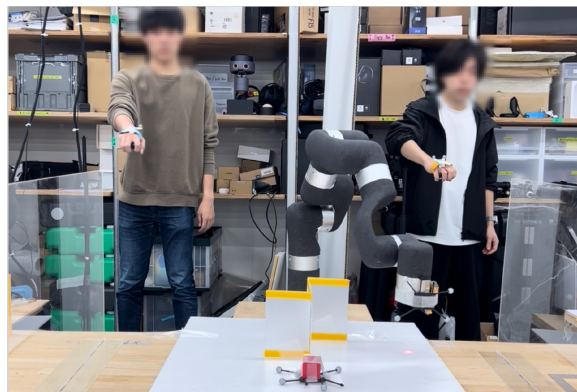


図 1: 実験の様子。2人で1つのロボットアームを操作し、目の前の障害物を左右のどちらかに回避しながら赤いリーチングターゲットを目指す。

取り付けられたマーカーをモーションキャプチャーシステム (OptiTrack Prime 13W, 8台のカメラ, 1280x1024ピクセル, 240fps, レンズ: 3.5mm F/2.4, 視野角: 水平 82度, 垂直 70度) で読み取り, 2人の移動距離を加重平均することでロボットアーム (xArm 7, 可搬重量: 3.5kg, リーチ: 700mm, 自由度: 7, 繰り返し精度: ± 0.1 mm, 最大速度: 1m/s) を操作することができる。

ロボットアームの動きは, ある反映率に基づいて2人の参加者の動きを計算し, それらを合計することによって決定された。式 1 にロボットアームの動きの計算方法を示す。 pos_{robot} と rot_{robot} は, ロボットアバターの先端位置 (x, y, z) と回転 ($roll, pitch, yaw$) である。これらは, それぞれの参加者の手の位置と回転 ($pos_{p1, p2}$, $rot_{p1, p2}$) に任意の比率 ($w_{pos1, 2}$, $w_{rot1, 2}$) を掛けたものの和によって計算された。タスク開始前に, 初期位置と回転を設定するため, 参加者は手の甲を上に向け, 指先を前方に向けて手を

前に出すように指示された。

$$pos_{robot} = pos_{p1} * w_{pos1} + pos_{p2} * w_{pos2} \quad (1)$$

$$rot_{robot} = rot_{p1} * w_{rot1} + rot_{p2} * w_{rot2}$$

今回の実験では、それぞれの参加者の動きが50%反映され、均等な担当割合でロボットアームを操作した。

2.2 参加者

12組24人（男性16人、女性8人、右利き22人、平均年齢23.67歳、SD=2.43）が実験に参加した。各参加者は右手でロボットアームを操作した。本実験は、大学の倫理委員会の承認を得て実施した。

2.3 実験デザイン

本実験は、1要因参加者内実験として設計した。実験の課題は、参加者がロボットアームを操作して障害物を回避し、赤いターゲットへアームの先端を到達させることとした。実験条件は、参加者1人でロボットアームを操作するソロ条件と、2人で操作する融合条件の2つである。各条件で、立ち位置（右、左）と障害物の形状（8種類）を組み合わせた16試行を行った。

実験セットアップにおいて、ロボットアームの初期位置からリーチングターゲットまでの直線距離は45cmであり、ターゲットに半径5cmまで近づくとロボットアームは停止しタスクが終了する。障害物は15cmの胴部分と2つの10cmの羽部分で構成され、初期位置から障害物中心までは25cmである。障害物は90度ずつ回転させた4種類と上下逆さまにした計8種類を使用した（図2B）。障害物はアクリル板に半透明のビニールで覆ったものを使用した。これは、参加者が立ち位置の反対側への見通しを難しくすることで、どちらから回避しても変わらないという選好を減らすことを目的とした。

障害物の脇にはアクリル板を設置し、障害物中心からの距離を25cmとした。これは、アクリル板がない場合に参加者が大回りできてしまい、タスクが簡単になることを防ぐためである。また、ロボットアームの現在位置を参加者に明確にするため、先端の真下にLEDライトを取り付けた。ロボットアームの先端の太さはLEDライト関連の機材を含めて11.5cmであった。障害物の形状ごとの両端のスペースは、13cm、15.5cm、18cm、24cmであった。

2.4 実験手順

参加者は実験説明の後、ロボットアームの操作に慣れるために5分の練習を行った。練習では障害物の形状を図2(A)で固定した状態で、右と左の順路のどちらからもリーチングできるように行った。参加者はどちらの順路でも一定の基準時間内に操作を完了させることができることを確認してから、実験に取り組んだ。

それぞれの参加者は先にソロ条件を行い、立ち位置（右、左）と障害物の形状（8種類）を組み合わせた16試行に取り組んだ。その間、もう1人の参加者は別室で待機し、パートナーとなる人がどのように取り組んだのか知らなかった。

融合条件の開始前に、参加者は実験者と共に融合状態の

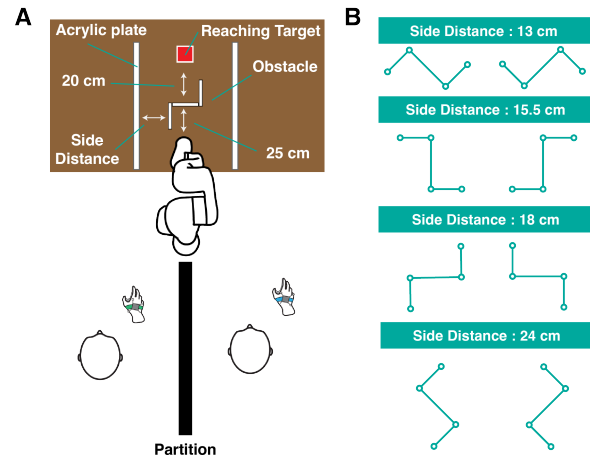


図 2: 実験構成。(A) 俯瞰図。(B) 障害物の形状

練習を行った。これは、融合状態を体験したことがない参加者がいるため、慣らしの期間を設けるためである。この練習中、実験者は能動的には動かさなかった。

融合条件では、ソロ条件と同様に立ち位置と障害物の形状を入れ替えながら16試行を行った。各試行前に、実験者は参加者に「どちらに動かすかを決めてください。ポンという音が鳴ったら、最初は自分が動かしたい方向に動かしてください。その後、ゴールへ向けて動かしてください。」と教示した。このとき参加者同士の間にはパーティションが設置されており、パートナーがどのように動かそうとしているのか確認することはできなかった。

3. 結果

本研究では、参加者が立ち位置と障害物の形状を組み合わせた16試行をソロ条件と融合条件で実施した。ソロ条件における参加者の戦略を個人の選好として分析し、融合条件での競合解消過程を詳細に調べた。

3.1 ソロ条件における選好

ソロ条件下での参加者の選択と立ち位置の関係をカイ二乗検定で分析した結果、立ち位置に依存した有意な選好が観察された ($p < .001$)。具体的には、参加者が右に立った場合は右方向へ、左に立った場合は左方向へ進む傾向が顕著であった。個別の参加者データを精査すると、半数の参加者が立ち位置に依存した選好を示す一方で、一部の参加者は常に同一の順路を選択したり、特定の立ち位置でのみ依存的な選択を行うなど、多様なパターンが確認された。

さらに、障害物の形状と立ち位置の関係性についてもカイ二乗検定を実施した。その結果、ほとんどの形状において立ち位置に依存した有意な選好が認められたが、一部の形状では有意な関係が見られなかった（図3）。

3.2 融合条件における選好

融合条件における選択が、それぞれの参加者のソロでの選好とどれだけ類似しているのか、立ち位置と選択した方向の2x2行列のコサイン類似度で比較した。その結果、8組は片方の参加者のソロ条件の選好と高く相関する傾向が現

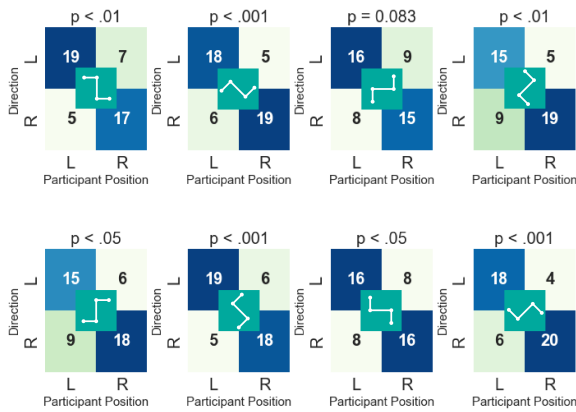


図 3: ソロ条件における障害物形状と立ち位置による左右選好

れた。一方で、4組はお互いの選好を上手く組み合わせさせてどちらも高い相関でソロ条件での選好を汲み入れた。

3.3 ソロ条件の選好に基づく競合予測

融合条件では、2人の参加者が異なる立ち位置からロボットアームを共同操作する必要があった。そのため、ソロ条件で異なる選好を示していた場合、意思の競合が生じる可能性が高いと予測された。例えば、両参加者が立ち位置依存型の選択をする場合、融合条件では必然的に立ち位置が異なるため、ソロ条件の選好を維持すると競合が発生すると推測される。

ソロ条件の選好に基づいて競合発生の可能性を算出したところ、全試行の61.5%で競合が予想された。最小値のペアでも16試行中8試行であり、すべてのペアにおいて半数以上の試行で競合が予測される結果となった。

3.4 競合の検出手法

2人で1つのロボットアームを操作する際に競合が発生した場合、参加者は主に2つの解決方略を取ることが可能である。一つは相手よりも大きく動かすこと、もう一つは動きを停止することである。

これらの競合を正確に検出するため、まず境界線を設定した。境界線は、障害物を左右に避ける経路上のそれぞれ5cmの位置に決定した。これは、すべての試行において、この位置を超えた後は同じ順路を進んだため、これを競合検出の基準とした。

今回以下の3つのシナリオに対応する検出手法を開発した。これらの手法はすべて境界線を跨ぐまでの軌跡データのうち左右の競合となるx方向のみを使用している。図4は、それぞれのシナリオに対応する軌跡である。

3.4.1 両参加者が大きく動く場合

各参加者の運動量 (Amount of Movements, AoM) を測定し、ロボットアームに反映されずに失われた運動量を計算することで検出する。2人の動きが完全に一致する場合、係数Xは2に近づく。本研究では、個別の軌跡分析からX = 2.5が最適な検出力を示したため、この値を採用した。

$$AoM_{robot} * X < AoM_{p1} + AoM_{p2}$$

3.4.2 両参加者が停止する場合

順路決定の境界点到達時間を測定することで検出する。本研究では、ソロ条件での境界点到達時間の1.5倍以上を要した試行を競合と判断した。

3.4.3 一方が停止し他方が動く場合

境界点通過時の各参加者の運動貢献度の比率を分析する。本実験では、一方の参加者が75%を超える貢献を示した試行を競合として分類した。

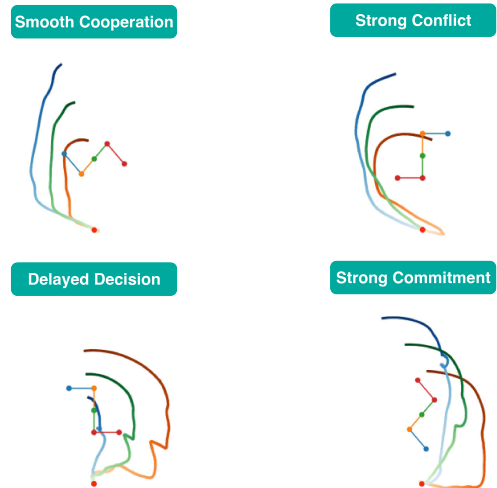


図 4: それぞれのシナリオにおける実際の軌跡

3.5 競合の発生頻度

先に説明した検出方法を用いて、それぞれ算出した。お互いが動き続けた試行が全体の39.1%、お互いが停止するなどして長く時間がかかった試行が全体の25.5%、片方の参加者が大きく貢献した試行が全体の29.2%であった。少なくとも1つの条件を満たす試行は全体の66.2%であった。

続いて検出された競合が、事前にソロで予測された競合だったのか検証した結果、全体の57.5%であり半数の競合は事前に想定されたものではなかった。また、ソロでのデータを用いて予測された競合/非競合が結果と一致したのは全体の48.4%であった。そのため、参加者は事前に行ったソロでの取り組みから変更して、融合条件の操作を行った可能性がある。

3.6 融合条件における参加者の運動方向の一貫性

融合条件において参加者が初動でどちらの方向へ移動しようとしていたのかを解析するために、10フレームごとの運動量からベクトルのx成分を求めた。それぞれの参加者が一定以上の運動ベクトル(x方向に対して2.5cm/s)が確認された方向を参加者の運動方向とした。境界線を跨ぐまでに一定量の運動方向の移動が見られなかったり、運動速度の上昇がパートナーと比較して0.4秒以上遅い場合は、運動方向をなしとした。

ソロ条件と比較して、同じ方向へ動き出したのは全体の43.0%であった。また、異なる方向へは全体の43.5%であり、運動方向なしに分類されたのは13.5%であった。今回参加

者ごとの傾向を分析するためにクラスター分析も行った。エルボー法とシルエット分析の結果から、最適なクラスタ数は3~5程度であると判断でき、今回は4と設定した。

クラスター分析の結果、参加者は4つの特徴的なグループに分類された。最も多くの参加者(12人)を含むグループは、異なる向きへの初期の動きが多いものの、同じ方向への初期の動きも比較的多く見られた。次に、同じ方向への初期の動きが非常に多く、ほぼ異なる向けへは動かないグループ(4人)が観察された。また、「運動方向なし」が顕著に多いグループ(3人)も確認された。最後に、半数以上の試行で異なる初動の動きをしたグループ(5人)が存在した。

これらのクラスタリングのなかで、同じペア内の参加者が異なる特徴を持つグループに属する傾向が見られた。3.2のコサイン類似度と合わせて比較すると、高い類似度を持つ人はソロと同じ初動をする傾向があり、反対に低い類似度を持つ人は運動方向なしを多く選択する傾向にあった。

3.7 融合条件における参加者の運動方向決定への寄与度

これまでの研究では、運動量の多い参加者が進路を決定するとされてきた。そこで、今回新たに設定した境界線までのリーダーフォロワー(以下LFとする)の関係と試行全体のLFの関係のどちらが正しく進路の決定者を分類できるか解析した。境界線までのLFと全体のLFの一貫性は、76.6%であった。

境界線と全体のリーダーがそれぞれどの方向へ初動を動き出していたのかと、実際に融合条件で進んだ方向の一致率を計算した結果、全体のリーダーは76.6%だったのに対し、境界線までのリーダーは85.4%で一致していた。このことから、一部の参加者は全体のリーダーとして役割を担うのではなく、意思決定部分でのみリーダーとしての行動を行う、決定のリーダーの存在が示唆された。

4. 議論

参加者は障害物の形状よりも立ち位置に依存した選択を行った。これは、ロボットアームの操作時間のうち、なるべく長く視認できる取り組みをしたかったことが考えられる。実際に参加者のコメントで半数の人が見えやすい方向から取り組んだとしていた。一方で、融合条件においては立ち位置に依存した選択の傾向が弱まった。これは、参加者のコメントで自分が見えづらくてもパートナーが見えているという信頼があったとしているため、ソロ条件ではできなかった思い切った行動がとれた可能性がある。このことから、2人で協力する実験系においては、ソロとは異なる運動戦略を持つ可能性がある。

本研究では、先行研究で扱われてきた運動全体のリーダーではなく、2人の運動意図が揃う境界線までのリーダーという新たな定義を導入した。この定義は運動全体のリーダーと比べて、運動の方向を説明する分類器として適していた。この結果は、動作の工程ごとにリーダーとフォロワーの関係性が動的に変化し、相補的な運動が行われている可能性を示唆している。この高い予測精度は、我々の新しいリー

ダー定義の有効性を裏付けるものであり、複数人での協調作業におけるリーダーシップの動的な性質の理解を進める可能性がある。

今回の競合の検出方法は多くの競合を検出できている一方で、実際に発生した数より多く検出している可能性がある。この過剰検出の要因として、以下の複数の変数が考慮される：(1)参加者間の動きだすタイミングの差、(2)個人最適化とペア最適化の間のトレードオフ、(3)過去の選択履歴による影響(例：連続した右選択後の右選択傾向)。これらの複合的要因による初期動作の遅延が競合として誤検出される可能性が存在する。今後の研究方針として、個別データの詳細な分析を通じ、上記の要因を考慮したより精緻な競合検出アルゴリズムの開発が必要であると考えられる。

本実験では、明示的な意思決定が必要な状況を設定したが、より自由度の高いリーチング課題のような暗示的な状況でも同様の現象が発生するかは不明である。今後は、より多様な実験設定での検証が必要である。また、競合時の運動の加減速決定メカニズムの解明や、個人差を考慮したモデルの構築など、さらなる研究の方向性が考えられる。

5. 結論

本研究は、2人が1つのロボットアームを操作するときに、お互いの運動意図が共有されていない状態をどのように解消するのか、障害物を回避をするリーチングタスクを実施し、意思決定への過程を調べた。その結果、参加者は1人で取り組むときと異なる運動戦略を持つ場合があり、さらに運動量を動作の工程ごとに変化させることで、全体の運動量が少ない参加者の運動意図が採用される場合があることが明らかになった。今後は、運動意図の衝突が操作体験にどのような影響を与えるのか検討を行なう。

謝辞 本研究はJSTムーンショット型研究開発事業「身体的共創を生み出すサイバネティック・アバター技術と社会基盤の開発」(Grant number JPMJMS2013)の支援を受けて行われた。

参考文献

- [1] Ganesh et al., "Two is better than one: Physical interactions improve motor performance in humans", *Scientific Reports*, 2014
- [2] Takagi et al., "Individuals Physically Interacting in a Group Rapidly Coordinate Their Movement by Estimating the Collective Goal." *eLife* 8, 2019
- [3] Kropivšek et al., "Leader-Follower Role Allocation for Physical Collaboration in Human Dyads." *NATO Advanced Science Institutes Series E: Applied Sciences*, 2021
- [4] Čamernik et al., "Leader-follower Dynamics in Complex Obstacle Avoidance Task." *Advanced Robotics*, 2023
- [5] Hagiwara et al., "Collaborative Avatar Platform for Collective Human Expertise.", *SIGGRAPH Asia 2021 Emerging Technologies*, 2021