

VR 環境の対人インタラクションにおける発達傾向と文化差の相互作用

代表研究者

福井 隆雄

東京都立大学システムデザイン学部 准教授

1 はじめに

社会生活において他者と協調することは非常に重要である。共同行為(joint action)とは、物を一緒に支える動作(Guo et al., 2019)のように、2人以上が空間と時間で互いの行動を調整しあうことである(Schmitz et al., 2017; Sebanz et al., 2006)。我々は日常的に共同行為を通じて、他者との協調的活動を実現している。共同行為を円滑に行うためには、視覚情報や自己受容感覚などの感覚フィードバックを用いて、運動の制御を行いながら、相手の運動を理解・予測しながら自身の運動を適応的に調整する必要がある。さらに、共同行為を円滑に行うためには、他者の行為の予測、理解をするだけでなく、適切なタイミングで自身の運動を制御する必要がある。

Sacheli et al. (2013)は、2人の参加者にそれぞれリーダー（事前に物体の把持位置 [上部もしくは下部] が指示され、ヘッドフォンからの音を合図にフォロワーと同じタイミングで把持をする）とフォロワー（事前に物体の把持位置 [リーダーと同じ位置もしくは異なる位置] が指示され、ヘッドフォンからの音を合図にリーダーと同じタイミングで把持をする）の役割を与え、その際の運動学的特性を検討した。その結果、リーダーは、物体の上部を把持する場合、フォロワーよりも軌道を高くし、逆に、物体の下部を把持する場合、フォロワーよりも軌道を低くした。つまり、役割に応じて運動が調整され、リーダーはフォロワーが自身の動きを予測しやすくするために、運動戦略を調整したと考えられる。このように共同行為の中で見られる、目標の達成に向けて相手を誘導することを目的とした戦略的な行為はシグナリングと呼ばれている(Pezzulo & Dindo, 2011)。その他の例として、試行間で動作の持続時間を一定にし、運動のばらつきを少なくすることで相手がタイミングを予測しやすくするという戦略(Candidi et al., 2015)も挙げることができ、円滑な共同行為に貢献するものである。

乾杯動作は「液体の入ったグラスを相手の方に移動させ、相手のグラスと触れさせる行為」であり、世界中で見られる酒宴の挨拶であり、この動作も共同行為の1つとしてとらえることができる。乾杯動作には文化差があることが興味深い点である。日本では相手のグラスを注視しながら乾杯動作を行う習慣があり、乾杯動作中の眼と手腕の動作のターゲットは、どちらも同じ相手のグラスである。一方、ヨーロッパ諸国（フランスやドイツ）では相手とアイコンタクトを行いながら乾杯動作を行う習慣があり、乾杯動作中、視線は相手の眼を見ているのに対し、手腕の動作のターゲットは相手のグラスであるため、眼と手腕のターゲットが異なる。そのため、乾杯動作は文化的な調節（ヨーロッパ人は眼と手腕のターゲットが異なり、日本人は眼と手腕のターゲットが同じ）を受けているので、動作形成の文化的調節を定量的に検討するのに興味深い動作である。

乾杯動作時に限らず、アイコンタクトについて、（日本人を含めた）東アジア人は欧米人に比べてアイコンタクトの頻度が低いことが知られている(e.g., Hawrysh & Zaichkowsky, 1990)。また、このような文化差による違い以外に、発達障害の1つである自閉スペクトラム症(Autism spectrum disorders: ASD)の特異的な視線行動特性も指摘されている。ASDは、Asperger (1944)とKanner (1943)によりほぼ同時期に独立に初めて報告され、1)アイコンタクト、表情、ジェスチャーなど非言語コミュニケーションの質的障害といった対人関係の特異性、2)話し言葉の発達の遅れまたは欠損、3)想像性の障害による活動や興味における著しい限局性、行動の反復性、常同性（こだわり）が認められ(Wing & Gould, 1979)、中枢神経系に何らかの要因による機能不全があると推定される。ASD者は日常場面で「目が合わない」と言われるように、実際、顔刺激を用いた視線行動分析の結果では、定型発達者に比べて、目を見る割合が低い(e.g., Phillips et al., 1992)と報告されている。ASD者の運動機能について、到達把持動作の運動学的特性(e.g. Fukui et al., 2018; Yang et al., 2014)とともに、共同行為における運動学的特性についても検討されてきた。Curioni et al. (2017)では、自閉傾向の高い群(autism spectrum conditions: ASC)の1名と自閉傾向の低い群(neurotypical: NT)の1名によるペアを作り、上記のSacheli et al. (2013)と同様の課題を行った。この課題では、リーダーは自身の運動を通じて、把持位置と把持のタイミングをフォロワーに伝える必要があるが、ASC者はNT者に比べ、リーダーの際、反応時間と運動時間ともに有意に短い結果となり、自閉傾向が高

い参加者ほど、共同行為における役割に応じた運動の調整が行われにくい可能性が示唆された。

実空間における乾杯動作についてこれまで検討を行っており (Eguchi & Fukui, in preparation), その結果を踏まえて、本研究では、COVID-19 の拡大により対人コミュニケーションツールとしての重要性を増している VR 空間における乾杯動作の運動学的特性に文化差や発達傾向 (自閉傾向) が及ぼす影響を検討する。文化差について、本来は、行動様式の異なる日本人とヨーロッパ人を比較することが直接的であるが、本研究では定型発達日本人を対象に、文化的に習慣化されている動作 (グラスを見ながら乾杯を行う) と、文化的に習慣化されていない動作 (相手をアイコンタクトを行い乾杯を行う) を比較することで、文化的影響の抽出を試みた。

2 方法

2-1 実験参加者

右利きの大学生・大学院生で、日常的に酒席で乾杯動作を行っている 24 名 (全て男性, 平均年齢 $\pm$ SD): 23.0 ± 1.4 歳) を対象に実験を行った。参加者の利き手については、エジンバラ利き手テスト (Oldfield, 1971) を用いて右利きであることを確認した。本実験は参加者内の実験計画であり、この実験デザインにおける適正サンプルサイズは G-power (効果量: 0.25, 有意水準: 0.05, 検出力: 0.8 と設定) により 24 名と算出された。研究実施にあたり、東京都立大学日野キャンパス研究倫理委員会の承認を得た (承認番号: H23-019)。また、ヘルシンキ宣言に則って、全ての実験参加者に口頭及び書面による説明を行い、実験参加の同意を得た。

2-2 実験装置

実験のセットアップは図 1 のとおりである。三次元動作解析装置の OptiTrack (Natural Point Inc.) の Prime13 (120 Hz) を使用した。乾杯動作で用いるグラスに関して、一般的に用いられるガラス製のグラスでは、グラスによる光の反射により、光学式のセンサーを用いる OptiTrack にノイズが入る可能性がある。そのため、乾杯動作で使用するグラスは 125 ml の水の入った RIVERT 社の木製グラス (口径 65 mm, 高さ 200 mm, 容量約 270 ml) を使用した。また、サージカルテープ (医療用補助テープ) を用いて実験参加者の手首 (橈骨茎状突起の遠位-遠位面) に赤外線を反射するマーカ (直径 6.4 mm) をつけ、手首の動きのトラッキングを行った。VR 映像を提示するハードウェアである HMD (Head Mounted Display) には、HTC 社製の VIVE Pro Eye (解像度 2880×1600 ピクセル, リフレッシュレート 90 Hz, 視野角最大 110°) を用いた。この HMD にはアイトラッキング機能 (視線データ出力周波数: 120 Hz, 精度: $0.5^\circ - 1.1^\circ$, 追跡可能視野角: 110°) が搭載されているが、視線データ出力周波数は、後述する開発環境である Unity の SDK (Software Development Kit) に依存するため、実験では 50 Hz の視線データ出力周波数で視線計測を行った。PC には HMD を使用するための最小システム要件を満たす GALLERIA XA7C-R37 (OS: Windows 10 Home 64bit, CPU: Core i7-11700, GPU: GeForce RTX 3070 8GB GDDR6, メモリ: 16GB DDR4 SDRAM) を使用した。乾杯動作の合図であるビーブ音の生成には、音声録音ソフト Audacity を使用し、440 Hz の 100 ms 継続するビーブ音を作成した。ビーブ音は HMD のヘッドフォン (JAS 認定 Hi-Res ヘッドフォン) を通じて再生された。

2-3 VR 環境の構築

VR 空間を構成するプラットフォームとして Unity2020.3.17 を用いた。乾杯相手と参加者のアバターは、オープンソースの人体モデル生成ソフトウェアの MakeHuman 1.2.0 を用いて作成した。これは年齢、身長、性別などの情報を入力することでアバターを作成することができる。本実験では 22 歳の日本人男性の平均身長と平均体重に設定し、顔は日本人の顔に近くなるようにアバターを作成した。アバターの衣服はカジュアルな服装 (白シャツ) とした。また、グラスは 3DCG 制作ソ

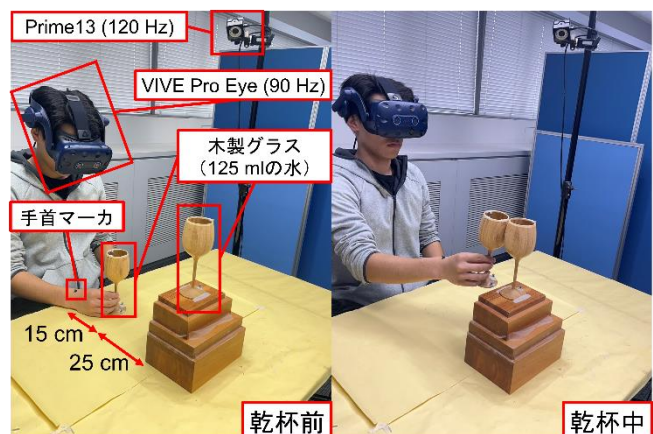


図 1 実験セットアップ

ソフトウェアの Blender 2.93 を用いて、実際のグラスと同じ大きさに作成した。作成したアバターとグラスは fbx ファイルで Unity へ出力した。机や部屋などのその他のオブジェクトは Unity 上で作成した。また、VR 空間上と実際のグラスの位置情報・回転情報の同期に関して、OptiTrack 社が提供するプラグイン Unity Plugin 1.0.1 (https://mocap.jp/optitrack/software/download_plugin/) を用いることで同期を実現した。このプラグインでは、三次元動作解析装置のソフトウェアである Motive で作成された剛体の重心の位置情報と回転情報を Unity 上のオブジェクトに反映させることができる。参加者用のグラスには、Motive 上での剛体の重心がグラスの中心になるように、6 つの赤外線反射マーカを貼付し、乾杯相手のグラスには、3 つの赤外線反射マーカを貼付し、Motive 上で剛体を作成した。これにより、実際のグラスと Unity 上のグラスの位置と回転角を同期させた。一方で、Motive 上の原点と Unity 上の原点のずれや Motive の剛体の重心と Unity のオブジェクトの重心のずれにより、グラスの位置が Unity 上で正しく反映されない場合がある。その場合、Unity 上のグラスの初期位置と Motive の剛体の位置情報の差分をとり、その差分をオフセットとすることで、補正を行った。アバターの手腕の同期には、Unity のアセットである FinalIK (<https://assetstore.unity.com/packages/tools/animation/final-ik-14290?locale=ja-JP>) を用いた。このアセットでは、空間で特定の点を決め、そこから逆算し、終了点が選択した位置になるように有効な方向に各ジョイントを向かせることができる。つまり、参加者のアバターの右手の位置をグラス把持位置に設定することで、その位置座標から、人体モデルに基づいた右肘・右肩の回転が計算されるため、自然に右手をグラスに追従させることができる。これらより、参加者は仮想空間上のグラスを自由に動かすことができる環境を構築した。

2-4 手続き

まず、実験参加者は自閉傾向を評価する質問紙「自閉症スペクトラム指数 (Autism-Spectrum Quotient, AQ)」(Baron-Cohen et al., 2001; 若林ら, 2004) とエジンバラ利き手テストの質問紙 (Oldfield, 1971) に回答した。AQ は自己回答式のものであり、5 つの下位尺度「社会スキル」、「注意の切り替え」、「細部への注意」、「コミュニケーション」、「想像力」の各 10 問、計 50 問 (50 点) から構成される。そして、スコアが 33 点 (カットオフ値) 以上の場合、ASD である可能性が高いとされるが、最終的な診断を下すためには専門家によるアセスメントが必要となる。質問紙の回答後、手首に赤外線反射マーカをつけ、VIVE Pro Eye を装着し、VIVE Pro Eye のキャリブレーションを行った後、乾杯動作課題を開始した。OptiTrack と VIVE Pro Eye の同期は、赤外線 LED の点灯と同タイミングで Unity と TCP/IP 通信をすることで、LED の点灯時間と通信時間を同期のオンセットとした。また、実験条件に関して、図 2 に示す通り、(i) 対人なし・グラス領域注視条件 (乾杯相手がいない状態で固定されたグラスを注視しながら乾杯を行う [このグラスの位置は、後述(ii), (iii), (iv)と同じ]) と、(ii) 対人あり・グラス領域注視条件 (乾杯相手がいる状態で固定されたグラスを注視しながら乾杯を行う)、(iii) 対人なし・眼領域注視条件 (乾杯相手がいない状態で、相手がいる場合の眼の位置を注視しながら乾杯を行う)、(iv) 対人あり・眼領域注視条件 (乾杯相手とアイコンタクトをとりながら、相手が把持したグラスへの乾杯動作を行う) の 4 条件を設定した。条件ごとにブロック化し、各条件 5 試行の練習を行った後、本試行を各条件 15 試行行った。各ブロックの実施順序は参加者間でカウンターバランスを行った。

2-5 分析

三次元動作解析装置 (OptiTrack) により測定したデータは Motive 上でノイズを消去し、MATLAB R2019a で解析した。直交座標系によって与えられた手首の三次元位置データを 15 Hz のカットオフ周波数を有する二次のバターワースローパスフィルタによって記録し、オフラインでフィルタリングを行った。そして、手首動作開始から乾杯終了までの



図 2 各条件における VR 空間上での提示刺激

手首の最大速度、最大速度記録時間（運動時間に占めるパーセンテージを算出）、最大加速度、最大加速度記録時間（運動時間に占めるパーセンテージを算出）、移動距離を解析した。手首の動作開始時間は、ビープ音提示後、手首の移動速度が 5 cm/s を超えた時間とし、乾杯終了時間は実験参加者の体から奥行き方面に最も離れた時間とした。反応時間はビープ音が提示されてから手首の移動開始までの時間とした。算出した手首の運動学的特性に関して、分散分析（ $\alpha = 0.05$ ，参加者内 2 要因 [対人の有無，注視領域]）を行った。さらに、最大加速度と移動距離について、条件間の差分（眼領域 - グラス領域）と AQ スコア間でピアソンの相関分析を行った。

3. 結果

各条件における運動学的特性の結果を以下に示す（表 1，図 3）。

3-1 最大速度

主効果，交互作用ともに有意差は認められなかった（ $p_s > 0.106$ ）。

3-2 最大速度記録時間

主効果，交互作用ともに有意差は認められなかった（ $p_s > 0.243$ ）。

3-3 最大加速度

図 3a に示す通り，対人の有無について主効果が認められ [$F(1, 23) = 5.602$ ， $p = 0.027$ ，partial $\eta^2 = 0.196$]，対人なし条件に比べ，対人あり条件で有意に小さくなった。注視領域の主効果については有意傾向が認められ [$F(1, 23) = 4.100$ ， $p = 0.055$]，交互作用について有意差は認められなかった [$F(1, 23) = 0.538$ ， $p = 0.471$]。

3-4 最大加速度記録時間

注視領域の主効果については有意傾向が認められ [$F(1, 23) = 4.225$ ， $p = 0.051$]，対人の有無について主効果，交互作用について有意差は認められなかった（ $p_s > 0.153$ ）。

表 1 各条件における運動学的特性

	グラス領域		眼領域	
	対人なし	対人あり	対人なし	対人あり
最大速度 (cm/s)	39.8 (1.7)	38.4 (1.5)	38.6 (1.8)	38.1 (1.5)
最大速度記録時間 (%)	30.7 (1.0)	30.5 (1.1)	31.4 (1.2)	30.7 (1.1)
最大加速度記録時間 (%)	9.3 (1.1)	8.1 (0.8)	10.3 (1.3)	9.4 (1.1)

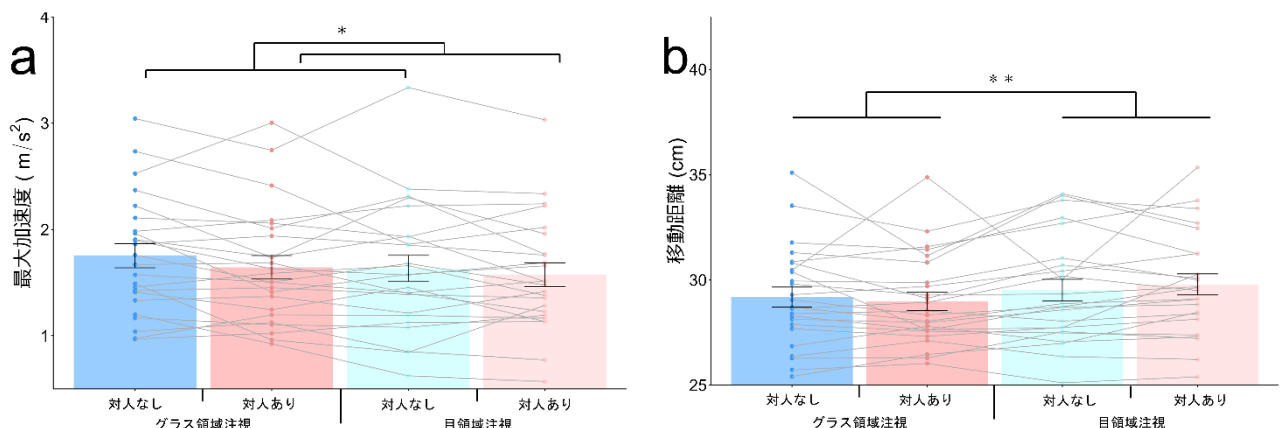


図 3 各条件における最大加速度(a)と移動距離(b)。エラーバーは標準誤差を示す。

3-5 移動距離

図 3b に示す通り、注視領域の主効果が認められ [$F(1, 23) = 13.104, p = 0.001, \text{partial } \eta^2 = 0.363$], グラス領域注視条件に比べ、眼領域注視条件で有意に大きくなった。対人の有無について主効果、交互作用について有意差は認められなかった ($ps > 0.106$)。

3-6 AQ スコアとの相関

最大加速度の条件間の差分（眼領域 - グラス領域）と AQ スコアの間に有意な正の相関が認められた ($r = 0.440, p = 0.032$) のに対して、移動距離の条件間の差分（眼領域 - グラス領域）と AQ スコアの間に有意な相関は認められなかった ($r = -0.082, p = 0.703$)

4. 考察

手首の最大加速度に関して、本研究では、対人なし条件に比べ、対人あり条件において有意に小さくなり、この結果は、実空間で乾杯動作の実験を行った Eguchi and Fukui (in preparation) とは逆の結果となった。また、手首の移動距離に関して、本研究では、グラス領域注視条件より眼領域注視条件のほうが有意に長くなったが、対人あり条件と対人なし条件では有意差は認められず、この結果は、Eguchi and Fukui (in preparation) で示された、対人あり・眼領域注視条件が対人なし・グラス領域注視条件や対人あり・グラス領域注視条件に比べ有意に長くなった結果とは異なるものであった。これらの結果の相違の要因の 1 つとして、VR 空間における距離推定の精度が考えられる。距離推定に関して、VR 空間は実空間よりも奥行き方向の距離の推定が不正確であることが報告されている (Creem-Regehr et al., 2005)。そのため、VR 空間において、最大加速度を小さくし、移動距離を長くするなど、正確な運動を実行するための戦略がとられた可能性が考えられる。移動距離に関連して、手首の軌道についても分析したところ、実空間で行われた Eguchi and Fukui (in preparation) では、相手に自分の動きが伝わりやすいように、対人あり・眼領域注視条件が対人なし・グラス領域注視条件や対人あり・グラス領域注視条件よりも高くなったが、本研究ではすべての条件でほぼ同じ軌道となった。これは、今回用いたアバターに対してそもそもシグナリングが生じなかった可能性を示唆している。最大加速度と AQ スコアとの関連に関して、AQ スコアが低い参加者ほど、眼領域注視条件の方がグラス領域条件よりも最大加速度が小さくその差も大きくなるということは、VR 環境では（実空間で見られたシグナリングよりも）むしろ視線と運動目標の不一致による課題の難しさに対する戦略がより優先された可能性がある。

今後は、VR 環境下でシグナリングを生じさせることのできるアバターの開発を試みながら、実空間・VR 空間でシグナリングが生じる文脈にどのような違いがあるのか、乾杯動作における運動学的特性と自閉傾向との関係について、より詳細に検討していく。

【参考文献】

- Asperger, H. (1944). 'Autistic psychopathy' in children. Translated in U. Frith (1991). *Autism and Asperger's syndrome*. Cambridge University Press.
- Baron-Cohen, S., Wheelwright, S., Skinner, R., Martin, J., & Clubley, E. (2001). The autism-spectrum quotient (AQ): evidence from Asperger syndrome/high-functioning autism, males and females, scientists and mathematicians. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 31(1), 5-17. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11439754>
- Candidi, M., Curioni, A., Donnarumma, F., Sacheli, L. M., & Pezzulo, G. (2015). Interactional leader-follower sensorimotor communication strategies during repetitive joint actions. *Journal of the Royal Society Interface*, 12(110), 0644. <https://doi.org/10.1098/rsif.2015.0644>
- Creem-Regehr, S. H., Willemsen, P., Gooch, A. A., & Thompson, W. B. (2005). The influence of restricted viewing conditions on egocentric distance perception: implications for real and virtual indoor environments. *Perception*, 34(2), 191-204. <https://doi.org/10.1068/p5144>

- Curioni, A., Minio-Paluello, I., Sacheli, L. M., Candidi, M., & Aglioti, S. M. (2017). Autistic traits affect interpersonal motor coordination by modulating strategic use of role-based behavior. *Molecular Autism*, 8, 23. <https://doi.org/10.1186/s13229-017-0141-0>
- Guo, L. L., Patel, N., & Niemeier, M. (2019). Emergent synergistic grasp-like behavior in a visuomotor joint action task: Evidence for internal forward models as building blocks of human interactions. *Frontiers in Human Neuroscience*, 13, 37. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00037>
- Fukui, T., Sano, M., Tanaka, A., Suzuki, M., Kim, S., Agarie, H., . . . Wada, M. (2018). Older adolescents and young adults with autism spectrum disorder have difficulty chaining motor acts when performing prehension movements compared to typically developing peers. *Frontiers in Human Neuroscience*, 12, 430. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2018.00430>
- Hawrysh, B. M., & Zaichkowsky, J. L. (1990). Cultural Approaches to Negotiations: Understanding the Japanese. *International Marketing Review*, 7(2), 28-42. <https://doi.org/10.1108/EUM0000000001530>
- Kanner, L. (1943). Autistic disturbances of affective contact. *Nervous Child*, 2, 217-250.
- Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9(1), 97-113. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/5146491>
- Pezzulo, G., & Dindo, H. (2011). What should I do next? Using shared representations to solve interaction problems. *Experimental Brain Research*, 211(3-4), 613-630. <https://doi.org/10.1007/s00221-011-2712-1>
- Phillips, W., Baron-Cohen, S., & Rutter, M. (1992). The role of eye contact in goal detection: Evidence from normal infants and children with autism or mental handicap. *Development and Psychopathology*, 4(3), 375-383.
- Sacheli, L. M., Tidoni, E., Pavone, E. F., Aglioti, S. M., & Candidi, M. (2013). Kinematics fingerprints of leader and follower role-taking during cooperative joint actions. *Experimental Brain Research*, 226(4), 473-486. <https://doi.org/10.1007/s00221-013-3459-7>
- Schmitz, L., Vesper, C., Sebanz, N., & Knoblich, G. (2017). Co-representation of others' task constraints in joint action. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 43(8), 1480-1493. <https://doi.org/10.1037/xhp0000403>
- Sebanz, N., Bekkering, H., & Knoblich, G. (2006). Joint action: bodies and minds moving together. *Trends in Cognitive Sciences*, 10(2), 70-76. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2005.12.009>
- Wing, L., & Gould, J. (1979). Severe impairments of social interaction and associated abnormalities in children: epidemiology and classification. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 9(1), 11-29. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/155684>
- Yang, H. C., Lee, I. C., & Lee, I. C. (2014). Visual feedback and target size effects on reach-to-grasp tasks in children with autism. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 44(12), 3129-3139. <https://doi.org/10.1007/s10803-014-2165-z>
- 若林明雄・東條吉邦・Baron-Cohen, S.・Wheelwright, S. (2004). 自閉症スペクトラム指数(AQ)日本語版の標準化・高機能臨床群と健常成人による検討 -. 心理学研究, 75(1), 78 - 84. <https://doi.org/https://doi.org/10.4992/jjpsy.75.78>

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
VR 空間における乾杯動作の運動学的特性	日本人間工学会関東支部第53回大会・第29回卒業研究発表会	2023 年 12 月