

複合現実環境下で協調作業をしている2者間の脳波同期解析 Inter-brain synchronization during a cooperative task under shared mixed reality environment

小川 雄太郎[†], 嶋田 総太郎[‡]

Yutaro Ogawa, Sotaro Shimada

[†] 明治大学大学院理工学研究科, [‡] 明治大学理工学部
[†] Graduate School of Science and Technology, Meiji University
[‡] School of Science and Technology, Meiji University
ce191013@meiji.ac.jp

概要

近年では、協調作業に適した環境の1つとして、複合現実 (Mixed Reality: MR) 環境がある。本研究では、MR環境下で協調作業を行っている2者の脳活動の同期を、脳波同時計測手法 (ハイパースキャンニング) で調査した。実験の結果、協調作業をしているときの方が、単独作業をしているときよりも、前頭前野における2者間脳波同期が高まった。また、アンケートスコアと脳波同期の相関解析から、MR環境における空間や図形の共有感が、脳波同期と関係していることが示された。以上より、前頭前野における2者間脳波同期は、MR環境下での協調作業中の質を反映している可能性が示唆された。

キーワード: 脳間同期 (inter-brain synchronization), 脳活動同時計測 (hyperscanning), 複合現実 (mixed reality)

1. はじめに

協調作業とは、「複数の人々が同じ問題を互いに相互作用を持ちながら解こうとする作業」[1]である。協調作業の利点は、それによって個々の学習、理解が深まる場合があることだと考えられる。近年では、協調作業に適した環境の1つとして、複合現実 (Mixed Reality : MR) 環境が考えられる。MRとは、現実空間と仮想空間を混合し、現実のモノと仮想的なモノがリアルタイムで共存する新たな空間を構築する技術全般とされている[2]。MR環境におけるコンテンツは、仮想物体を使って設計することが可能であるため、自由度が高く、現実世界で実現が難しい課題も設計しやすくなる特徴がある。MR技術の効果的な利用法としては、現実の環境に仮想物体を重ね合わせて、その空間を複数人が同時に体験することが挙げられる。

先行研究により、互いに向かい合って協調作業をする2者間の脳活動の同期が前頭前野で生じたという結果が示されている[3]。これより、協調作業に適したMR環境においても、2者間の脳活動の同期が見られるという仮説が立てられる。そこで本研究では、MR環境下で協調作業を行っている2者の脳活動の同期を、2人の脳波を同時計測する手法 (ハイパースキャンニング) で調査した。

2. 実験

2.1. 被験者

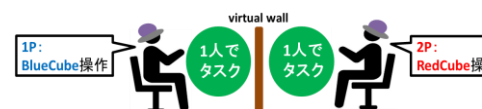
健康で知り合い同士の同性 16 ペアが実験に参加した (男性 9 ペア, 22.1 ± 0.95 歳 平均 \pm 標準偏差)。被験者からは、実験が始まる前に実験内容の説明をした上で、研究参加同意書の署名を得た。

2.2. 実験手順

被験者は、ヘッドマウント MR デバイス (HoloLens, Microsoft) を装着し、互いに向かい合って椅子に座り、MR環境下で作業を行った。



(a) cooperative 条件



(b) individual 条件

図1 各条件における図形課題中の様子

本実験では、MR 環境下でヴァーチャル図形を操作して、課題図形と同じ図形を組み立てていくタスクを行った。本実験は、ペアで協力して組み立てていく cooperative 条件 (図 1a) と 1 人だけで組み立てていく individual 条件 (図 1b) の 2 条件を設けた。

各条件ともに、実験担当者の「始め」の口答合図をタスク開始とした。合図後、被験者はまず、画面中央付近に存在する「Sample」ボタンを押下し、課題図形を出現させた。それから、各被験者視点で、画面の左側に存在する「BlueCube」もしくは「RedCube」ボタンを押下し、組み立てに使用するヴァーチャル図形 (Cube) を出現させた。各被験者が組み立てに使用する Cube の色は予め決まっており、1P が BlueCube、2P が RedCube を操作した。そして、画面中央にある白い小さな立方体 (縦 3 個×横 5 個×奥 3 個) を座標の目印として、課題図形と同じ図形を組み立てていった。

individual 条件では、MR 環境下に virtual wall をペアの間に設置し、各被験者は、その壁の内側で個人でタスクを行った。また、individual 条件では、課題図形が各々の担当する色のみで構成されているが、形状は cooperative 条件の課題図形と全く同じものにした。図形の組み立てが完了したかどうかは、被験者自身が判断し、「終わった」と口答で合図をしてもらい、それをタスク終了とした。なお、cooperative 条件においては、課題図形の出現と「終わった」という口答での合図を、予めペアのどちらか一方が担当することを決めてもらった。

各条件のタスク終了後、被験者はそのタスクに関する自己評価アンケート (協調性、空間共有、図形共有) に回答した。

2.3. 脳波計測

実験課題を行っている間の被験者ペアの脳波を同時に計測した。脳波計測には g.tec 社製の脳波計 (BCI Research System) を用いた。脳波 (EEG) は Ag-AgCl アクティブ電極を拡張 10-20 法に則り、F5, F3, Fz, F4, F6, C5, C3, Cz, C4, C6, P5, Pz, P6, PO3, POz, PO4 の計 16 ヶ所に貼付し、基準電極を左耳朶、接地電極を AFz に貼付し計測した。0.5~60 Hz のバンドパスフィルタをかけ、サンプリング周波数 512 Hz で記録した。

2.4. 解析

EEG の計測エラーと身体の大きな動きによるアーチファクトが生じたため、全ての EEG データから 5 か所のチャンネル (F4, C3, C4, C5, Pz) のデータを除外した。

脳波解析には数値解析ソフト (MATLAB R2018b, The MathWorks, Massachusetts, USA) を使用した。まず、得られた EEG データから、開始と終了の合図で記録された信号をもとにタスク時間のみを切り取った。それから、ペア毎に各条件間での解析時間を等しくするため、データの長さを調整した。調整されたデータを、MATLAB 上で動作する脳波解析ソフト (EEGLAB 14.1.1, Swartz Center for Computational Neuroscience, San Diego, USA) を使用して、遮断周波数 35 Hz のローパスフィルタ (low pass filter: LPF) を適用し、アーチファクト除去とデータ解析のために 1 s 毎のエポックに分けていった。さらに、頭や目、身体の動きによるアーチファクト除去のために、 $\pm 100 \mu\text{V}$ の閾値を定め、そのアーチファクトを含むエポックを全て除外した。本研究では、この前処理段階で除外されなかったエポックのうち、2 者間で時間枠が共通であったエポックのみを、解析に用いる共通エポックとした。

ペア間の脳活動の同期を調査するために、Total Interdependence (TI) [4] を用いた。TI はスペクトルのコヒーレンスと定義されており、TI 値はウェルチ法を用いた振幅二乗コヒーレンスを計算し推定される。

$$TI_{x,y} = -\frac{2}{f_s} \sum_{i=1}^{N-1} \ln(1 - C_{xy}^2(i\Delta f)) \Delta f$$

上式における、 f_s はサンプリング周波数、 $C_{xy}(\lambda)$ は $f = \lambda/2\pi$ 時の 2 信号 x, y のコヒーレンス、 Δf は周波数分解能である。2 信号の TI 値を計算し求めることで、それらの総相互情報量を 0 から 1 の範囲で測定することができる。したがって、TI 値が大きいほど同期度が高いということを示す。本研究では各条件での 1~11 チャンネルの平均 TI 値を算出した。得られた平均 TI 値に対してタスクの 2 条件間で t 検定を行い検討した。

3. 実験結果

3.1. 主観的報告

各条件における全被験者の協調性、空間共有、図形共有に関するアンケートの平均スコアを図 2 に示した。なお、エラーバーは標準誤差を表している。 t 検定により条件間を比較したところ、全 3 項目で cooperative 条件におけるアンケートスコアが、individual 条件のスコアより、有意に大きい値となった (協調性: $t(31) = 26.12, p < 0.001$; 空間共有: $t(31) = 17.81, p < 0.001$; 図形共有: $t(31) = 23.57, p < 0.001$)。

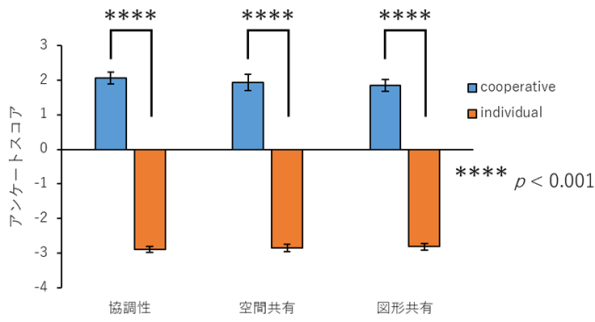


図2 各条件における協調性、空間共有、図形共有に関するアンケートの平均スコア

3.2. 脳波同期

チャンネル毎の平均 TI 値を *t* 検定により条件間で比較したところ、前頭前野に含まれる Fz において、cooperative 条件の平均 TI 値は、individual 条件の平均 TI 値より有意に大きい値となった ($t(15) = 2.66, p < 0.05$; 図 3)。

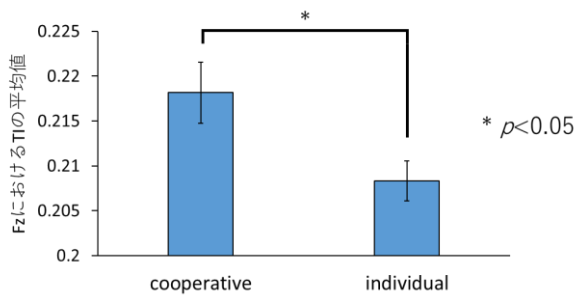
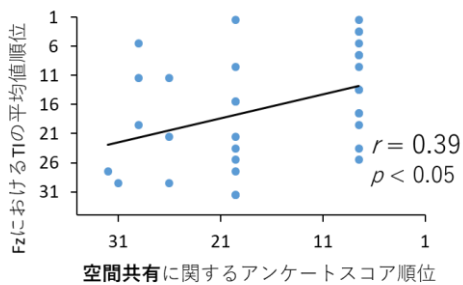


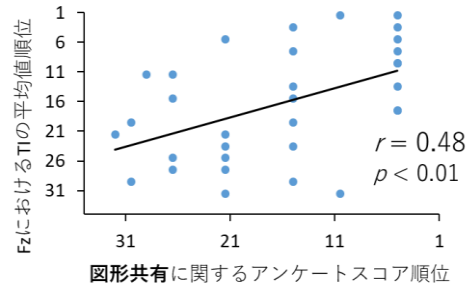
図3 各条件の Fz における平均 TI 値

3.3. アンケートスコアと TI 値との相関関係

各条件における協調性、空間共有、図形共有に関するアンケートの平均スコアと Fz における平均 TI 値に関してピアソンの順位相関解析を行った。cooperative 条件において、アンケート項目の空間共有と図形共有に関するアンケートスコアと、Fz における平均 TI 値との間に有意な正の相関関係が見られた (空間共有: $r = 0.39, p < 0.05$, 図 4a; 図形共有: $r = 0.48, p < 0.01$, 図 4b)。



(a) 空間共有



(b) 図形共有

図4 (a) 空間共有、(b) 図形共有に関するアンケートの平均スコアと Fz における平均 TI 値との関係

4. 考察

本研究では、MR 環境下で協調作業を行っている 2 者の脳活動の同期が生じるのかどうかについて、2 者の脳波を同時計測し、自己評価アンケートと脳波同期の結果から検討を行った。まず、自己評価アンケートの結果から、MR 環境下での協調作業の方が単独作業よりも、ペアとの協調感があったと感じていた。これより、本研究の cooperative 条件の内容は協調感を生むタスクであったといえる。次に、脳波同期解析の結果から、前頭前野において 2 者間の脳波が individual 条件よりも cooperative 条件の方で同期していた。このことは、協調作業中の 2 者間の脳活動の同期が前頭前野において生じることを報告した研究とも整合性がある [2]。前頭前野は、思考や行動の高次の認知制御を行うエグゼクティブ機能を担う脳領域とされている [5]。本研究のタスク遂行には、cooperative 条件において、自身のヴァーチャル図形の配置場所に加えて、相手の図形の配置場所も考慮しながら、適切な場所に配置していく必要がある。協調感が高かった cooperative 条件において前頭前野の同期度が高くなったことから、他者理解を含む高次の協調作業には、前頭前野の脳領域の活動が関わっていることが確認された。最後に、自己評価アンケートと脳波同期との相関関係の結果から、MR 環境における空間や図形の共有感、脳波の同期と関連していると考えられる。以上より、前頭前野における 2 者間脳波同期は、MR 環境下での協調作業中の質を反映している可能性が示唆された。

参考文献

[1] 三宅なほみ・落合弘之・新木真司 (1985) 『理解におけるインタラクションとは何かー認知科学選書 4 理解とは何か』 東京大学出版会

- [2] Silva, A. S., & Sutko, D. M. (2009). Digital Cityscapes: merging digital and urban playspaces. Peter Lang Publishing, Inc: New York.
- [3] Liu, N., Mok, C., Witt, E. E., Pradhan, A. H., Chen, J. E., & Reiss, A. L. (2016). NIRS-Based Hyperscanning Reveals Inter-brain Neural Synchronization during Cooperative Jenga Game with Face-to-Face Communication. *Frontiers in Human Neuroscience*, *10*, 82.
- [4] Dikker, S., Wan, L., Davidesco, I., Kaggen, L., Oostrik, M., McClintock, J., Rowland, J., Michalareas, G., Bavel, J. J., Ding, M., & Poeppel, D. (2017). Brain-to-Brain Synchrony Tracks Real-World Dynamic Group Interactions in the Classroom. *Current Biology*, *27*, 1375-1380.
- [5] 荻阪直行 (2012). 「前頭前野とワーキングメモリー-高次脳機能研究」, *32*, 7-14