

遠隔コミュニケーション環境における脳波同期現象の成立要件

ライ シンユ^{1,a)} 李 万慧^{1,b)} 天野 薫^{1,c)} 暦本 純一^{1,2,d)}

概要：先行研究では、脳間同期が協働作業中に発生し、コミュニケーションの有効性と密接に関連していることが示されている。しかし、遅延が発生する可能性のある遠隔環境において、この同期がどのような条件で維持されるか、または中断されるかについては十分に解明されていない。本研究は、異なる通信遅延が脳間同期に与える影響を検討し、同期が中断されることでコミュニケーションの質に影響が及ぶ閾値を特定することを目的とする。脳波測定を通じて、脳波位相の同期を示す指標である Phase Locking Value を用い、まず対面条件下での同期を確認し、その後、遠隔コミュニケーションにおける脳間同期の変化を観察した。結果として、遠隔コミュニケーション中にも脳間同期が発生することが確認されたが、信号処理を除く通信遅延が 450 ms を超えると同期が顕著に中断されることが明らかとなった。本研究の貢献は、脳間同期が遠隔コミュニケーションの質を評価する指標となり得ることを示唆し、遠隔コミュニケーションシステムや協働の改善に向けた貴重な示唆を提供するものである。

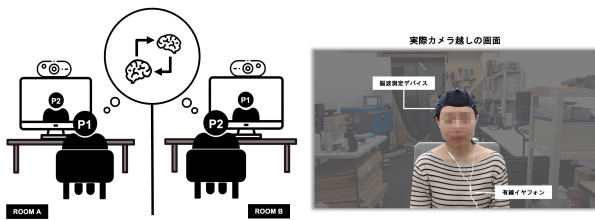


図 1 遠隔コミュニケーションにおいて、異なる通信遅延の下で脳間同期の違いを観察するために、脳波を測定する。被験者は脳波を測定するためのヘッドセットを装着し、コミュニケーション中には有線イヤホンを使用。

1. はじめに

技術の進歩と、仕事や社会的交流における柔軟性の必要性の高まりに伴い、遠隔コミュニケーションはますます普及している [1]。しかしながら、対面コミュニケーションと遠隔コミュニケーションの間には、コミュニケーションの質において大きな違いが存在する。対面コミュニケーションは、協力を促進し、グループの一体感を形成し、複雑なタスクの調整において特に効果的であり、こうした利点は

遠隔環境では達成が困難である場合が多い [2]。その主要な理由の一つとして、対面のやり取りが即時のフィードバックと非言語的な手がかりの円滑な交換を可能にし、これがより豊かなコミュニケーションの質に寄与している点が挙げられる [3] [4]。対照的に、遠隔コミュニケーションでは、参加者が顔の表情やジェスチャー、視線などを意識的に解釈しなければならず、通常対面環境では自動的に行われるこれらのプロセスが「非言語的過負荷」を引き起こすことがある [5]。この違いは、遠隔コミュニケーションに特有の課題を理解し、適切に対処することが協働の最適化と潜在的な欠点の最小化において重要であることを示している。

近年、多くの研究がハイパースキャニングという技術を利用し、社会的インタラクションの神経メカニズムを探索している [6]。この技術の発展により、複数の個人の脳活動を同時に観察することが可能となり、脳間同期の発見が促されている [7]。脳間同期とは、コミュニケーション中に複数の個人の脳波活動（ニューロンによって生成される電気信号）が同期する現象を指し、個人間の神経振動のコヒーレンスまたは phase-locking value (PLV) を分析することで計算される [8]。この現象は特に対面でのやり取りにおいて広く観察されており、脳活動の同期が成功したコミュニケーションの結果と関連していることが確認されている [9] [10] [11]。こうした研究結果に基づき、脳間同期はコミュニケーションの質を評価するための有望な指標として浮上し、インタラクションの有効性を定量的に評価する

¹ 東京大学

² ソニーコンピュータサイエンス研究所

a) sinyu-lai@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

b) li-wanhui409@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

c) kaoru_amano@ipc.i.u-tokyo.ac.jp

d) rekimoto@acm.org

手段を提供している。

現在の研究では、脳間同期が遠隔コミュニケーション中にも発生することが示されており、物理的に同席していなくても個人間で脳活動が同期する可能性があることが示唆されている [12] [13]。しかし、遠隔でのインタラクション中の同期レベルは、対面コミュニケーションと比較して著しく低い。ビデオ通話などの技術支援によるコミュニケーション中の脳間同期の減少は、通信遅延や感覚的豊かさの低下などの要因によるものであり、これらが同期の減少に寄与している可能性がある [12]。特に、デジタルコミュニケーションに固有の遅延は、会話におけるターン・テイキング (turn taking) のリズムやタイミングに干渉し [14]、会話の自然な流れを妨げ、参加者間のコミュニケーションを困難にすることがある。これにより、「Zoom 疲れ」と呼ばれる現象が発生する場合もある [15] [16]。したがって、これらの遅延による影響を理解し、それが脳間同期に及ぼす影響を解明することは、遠隔コミュニケーションの質を向上させるために重要である。遠隔インタラクション中の遅延の影響をさらに掘り下げて検討することで、これらの要因を緩和し、遠隔コミュニケーションにおける脳間同期レベルの向上が期待できる。

デジタルコミュニケーションに特有の通信遅延が会話の自然な流れを妨げ、脳間同期を低下させることが観察されていることから、本研究はこれらの遅延が遠隔コミュニケーションにおける脳間同期の低下にどの程度寄与するかを調査することを目的とする。我々は、遠隔コミュニケーション環境における通信遅延の存在が脳間同期の有意な減少を引き起こし、結果的にインタラクションの質に影響を与えると仮定する。この仮説を検証するため、さまざまな通信遅延をシミュレートする実験設定を用い、脳間同期への影響を系統的に評価した。脳間同期は脳波計測 (electroencephalogram; EEG) を用いて測定され、PLV を通じて定量化された。脳波は、デルタ波 (0.5~4Hz)、シータ波 (4~8Hz)、アルファ波 (8~12Hz)、ベータ波 (12~35Hz)、およびガンマ波 (35Hz 以上) といった異なる周波数帯域に分類され、それぞれが異なる認知および行動状態と関連している。本研究では、主にベータ波 (13.5~29.5Hz) の同期に焦点を当てた。ベータ波は、集中力、論理的思考、および問題解決において重要な役割を果たしている [17]、参加者間のコミュニケーションの質を評価するために適切である。図 1 に示すように、参加者は脳波測定用のヘッドセットを装着し、異なる通信遅延下での脳間同期を観察した。この研究により、遠隔環境における通信遅延が同期にどのように影響を与えるかを明らかにし、脳間同期が遠隔インタラクションにおけるコミュニケーション品質の指標としても機能し得ることを示す証拠を提供することを最終的な目標としている。

2. 関連研究

2.1 コミュニケーションにおける脳間同期

脳間同期は、コミュニケーション中に神経活動がどのように同期するかを理解する上で重要な概念である。この同期は、相互作用の同期性や他者の行動の予測、ターン・テイキングの共調整といった社会的インタラクションの特定の側面を反映していると考えられている [7]。研究では、脳間同期が協働作業 [10] [18]、共同問題解決 [9]、知識共有 [19] など、効果的なコミュニケーションに関連していることが示され、高い同期レベルが理解力や信頼感の向上と相関することが多い。たとえば、チームフローの状態、すなわちグループが共通の目標を達成するためにタスクに深く没頭している際、参加者はより高い脳間同期を示した [18]。

また、物理的な存在がない場合でも脳活動の同期が起こることも示唆されている。Pérez らの研究 [19] では、同じ空間での言語コミュニケーション中に参加者が互いに見えない場合でも脳が同期していることが確認された。また、別の研究では、現実環境と仮想環境での脳間同期を比較し、仮想現実環境でアバターを通じて対話する際にも同期が達成され、物理的な同席が神経の同期に必ずしも必要でないことが示されている [20]。

脳間同期に関する研究は、物理的に同席していない遠隔コミュニケーションや、非言語的の手がかりが乏しく遅延が発生する状況に焦点を当てたものが少ない。Schwartz ら [12] は、ビデオチャットツールを用いた遠隔コミュニケーション中にも脳波が同期することを発見したが、対面条件と比較して同期レベルが低いことも明らかにし、遠隔環境で同程度の神経同期を達成することが困難であることを示している。デジタル環境におけるこの同期低下のメカニズムはまだ十分には理解されていない。デジタルコミュニケーションの普及が進む中、こうした状況下での脳間同期を深く理解することは重要である。本研究は、遠隔コミュニケーション中の脳間同期に影響を与える特定の要因を調査し、コミュニケーションの質に対するその影響について深い洞察を提供することを目的とする。

2.2 異なる関係性における脳間同期

個人間の関係性の違いは、コミュニケーション中の脳活動同期の程度に大きく影響を与える可能性がある。Pan ら [21] は、恋人、友人、見知らぬ人の中での協働作業中の脳間同期を比較し、恋人のペアでは有意に高い同期が見られ、最も高いタスクパフォーマンスが達成されたことを示し、情緒的な親密さや馴染み深さが神経の同期を強化することを示唆している。親子の相互作用においても同様の現象が観察されている。Reindl ら [22] は、協働中に親子のペアで有意な脳間同期が確認されたが、見知らぬ人同士では同

期が発生しなかったと報告している。これらの結果は、脳同期に関する研究の設計において被験者間の関係性を考慮することの重要性を示しており、関係性が研究の結果に与える影響の大きさを示している。

2.3 ビデオ会議における遅延

ビデオ会議ツールにおける遅延は、コミュニケーションの質やユーザー体験に大きな影響を与える。遅延は、ビデオのキャプチャ、エンコード、デコード、表示、ネットワーク通信などの段階で発生する [23]。Boland ら [14] は、Zoom での会話におけるターン・テイキングの遅延が平均 487 ms であるのに対し、対面のやり取りでは 135 ms であると報告している。また、Zoom などのプラットフォームにおける音声伝送遅延は通常 30~70 ms の範囲である [14]。通信遅延が増加すると、コミュニケーションへの影響が顕著になり、Garg ら [24] は 500 ms 以上の遅延が認識されやすく、これにより同時発話の増加や相互沈黙の増加、話者交代率の低下などの問題が生じることがある [14] [25]。さらに、Schoenenberg ら [25] は、遅延が高いほど意図しない割り込みが増加し、ビデオ会議中のやり取りがさらに複雑になると報告している。こうした遅延閾値を理解し対処することは、ビデオ会議を介したコミュニケーションの質や効果を維持するために極めて重要である。

3. 手法

3.1 実験参加者

本実験には、21 歳から 31 歳の 22 名の参加者（男性 13 名、女性 9 名、平均年齢 24.72 歳、標準偏差 2.75）が参加した。参加者は 11 組のペアに編成され、各ペアはお互い知り合いであり、母語レベルで同じ言語によるコミュニケーションが可能であった（7 組は中国語、4 組は日本語を使用）。参加者は全員、視力および聴力が正常であり、ビデオチャットツールの使用経験がある学生であり、実験参加に支障となる身体的または神経的な疾患も報告されなかった。実験前には全ての参加者に実験の説明をし、同意を取得し。参加の謝礼として各参加者に時給 1000 円相当のギフト券を提供した。

3.2 環境設定

制御された実験を実施するため、対面環境と遠隔環境の 2 つの異なる環境を構築した。対面環境（図 2 B）では、1 メートルの間隔をあけて向かい合うように 2 脚の椅子を配置した。参加者は椅子に座り、直接対面で会話してもらった。

遠隔環境（図 2 A）では、12 メートルの距離をあけた 2 つの部屋を用意した。この距離は、参加者が通常の声量で話しても、提供されたイヤホン以外では互いの声を聞き取れないよう設定されたものである。ネットワーク伝送に

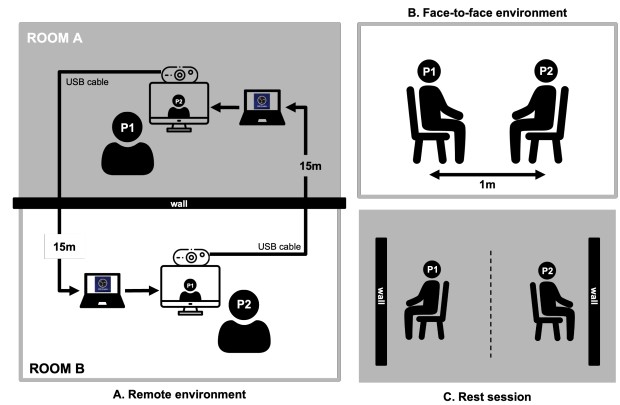


図 2 環境設定の画像: (A) 遠隔コミュニケーション環境では、参加者は別々の部屋に分かれてコミュニケーションを行った。1 つの部屋でウェブカメラにキャプチャされた映像は 15 メートルの USB ケーブル通じてもう一方の部屋のラップトップへ送信された。遅延はラップトップが信号を受信した際に OBS を用いて制御された。その後、映像はラップトップのある部屋のモニターに表示された。(B) 対面コミュニケーション環境では、参加者が同じ部屋で 1 メートルの距離を置いて座り、直接対面でコミュニケーションを行った。(C) レストタスク中、参加者はコミュニケーションを行わず、互いに見えない位置に座っていた。レストタスクは両方の環境設定とも実施され、対面環境では、参加者が同じ部屋内で異なる壁に向かうよう指示され、遠隔環境では、参加者が別々の部屋に物理的に分けられた。

よる不安定な遅延を排除するため、Room A に設置した macOS 搭載ラップトップを、Room B に配置したカメラ (C922 PRO HD Stream Webcam, Logitech International S.A.) に 15 メートルの USB ケーブルで接続し、カメラの映像は Room A のモニター (EIZO EV2785-BK) に表示された。Room B のモニターは Room A のカメラに同じ方法で接続された。さらに、両部屋のモニターには有線イヤホン (EarPods, Apple Inc.) が設置され、遠隔タスク中に参加者が互いにコミュニケーションを取れるようにした (図 5)。両部屋で使用されたモニター、カメラ、およびイヤホンは、実験環境の一貫性を確保するために同一モデルで統一した。

ソフトウェアに関しては、OBS ^{*1} およびそのプラグインを使用して参加者間のビデオ通話を実現し、遅延設定を行った。両ラップトップは同じ方法でセットアップされており、各ラップトップが別の部屋のカメラに接続されているため、OBS を使用してカメラの映像を接続されたモニターに直接表示し、参加者が別の部屋のシーンを見ることができるようになった。その後、OBS 内蔵の Video Delay プラグインを使用してビデオ遅延を設定し、別途ダウンロードした VST 2.x Plugin を使用して音声遅延を設定した。これらのプラグインは、1 ms 単位の精度で微調整が可能である。さらに、環境ノイズを最小限に抑えるため、OBS 内蔵のノイズ抑制プラグインを用い、抑制レベルを -20dB

^{*1} OBS, Open Broadcaster Software, <https://obsproject.com>

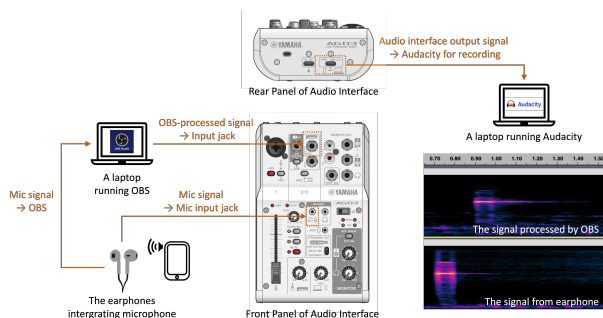


図 3 音声信号遅延を確認する方法。

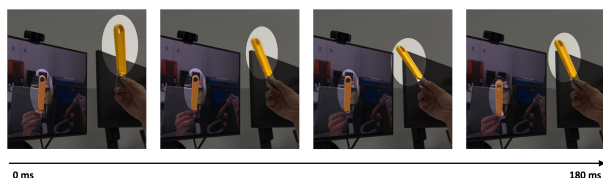


図 4 映像信号遅延を確認する方法。

に設定した。

以上の設定によってインターネットによる遅延は回避されたものの、信号処理に伴う遅延は完全には避けられなかった。信号処理の遅延を明確にするため、音声および映像信号の遅延をそれぞれ別々にテストした。実験条件下では遅延を 0 ms から 600 ms まで 150 ms 間隔で設定したため、信号処理による遅延を確認する際には異なる遅延条件下での音声と映像の遅延も確認した。その結果、信号処理による遅延は異なる遅延条件下でも比較的一定であることが示された。音声および映像信号の確認方法は以下の通りである。

- **音声信号:** 図 3 に示す通り、イヤホンのマイクとラップトップのラインアウトをオーディオインターフェイス (YAMAHA AG03MK2)^{*2}に接続した。スマートフォンを用いて、イヤホンのマイクとラップトップの近くで一定間隔にビーブ音を再生した。この設定により、スマートフォンからの元の音（会話中の話者を表す音）と、OBS ソフトウェアで処理された音（会話中に相手が聞く音）を両方確認することができた。両方の音を記録し、音声処理ソフト Audacity^{*3}を使用して分析を行った。その結果、OBS で処理された音が元の音に比べて約 180 ms の遅延が生じていることが示された。
- **映像信号:** 図 4 に示す通り、ラップトップを外部モニターに接続し、モニターの上端中央にウェブカメラを配置した。このカメラもラップトップに接続され、OBS を通じてウェブカメラからの映像が画面に表示された。テストでは、参加者がカメラ前で基準物体を

^{*2} YAMAHA AG03MK2 ユーザーガイド, https://jp.yamaha.com/files/download/other_assets/2/1549762/ag06mk2_en_ug_b0.pdf

^{*3} Audacity, <https://www.audacityteam.org>

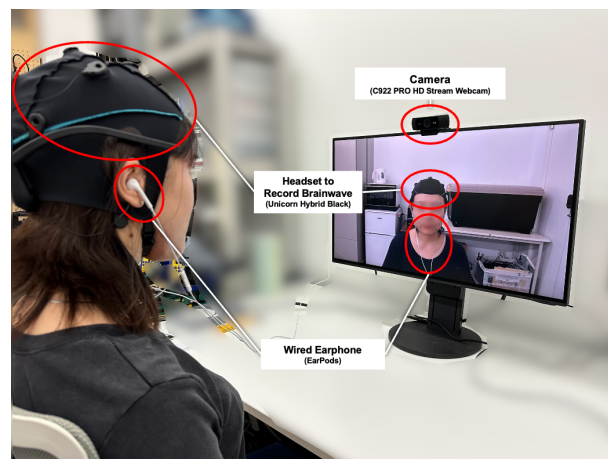


図 5 遠隔条件下での実験の様子。

動かし、別の参加者が 60fps のカメラを用いて、基準物体の動きと OBS で処理された映像を第三者視点で同時に記録した。ビデオ編集ソフトで確認した結果、OBS で処理された映像は元の映像に比べて約 180 ms の遅延があることが判明した。

3.3 手順

3.3.1 キャリブレーション

高品質な EEG データを取得するため、まず参加者に異なるサイズの EEG キャップを試着してもらった。これは、頭皮全体を覆い、頭蓋骨に密着する適切なキャップを選ぶことを目的としている。適切なキャップが選定された後、電極を装着し、導電性ジェルを塗布した。ジェルの塗布後には、Unicorn Suite ソフトウェアを使用して EEG 信号の品質を確認し、もし不良なチャンネルが検出された場合は、再度ジェルを塗布し、電極を調整することで、すべてのチャンネルが高品質な出力を示すようにした。

3.3.2 実験

実験全体は、対面と遠隔の 2 つの主要セッションに分かれ、計 8 つのタスクで構成されている。遠隔セッションでは、ビデオと音声の通信遅延をそれぞれ 0 ms, 150 ms, 300 ms, 450 ms, および 600 ms に設定し、5 つのタスクを実施した。すべての実験内容は表 1 に示しており、各タスクは 3 分間行われた。各参加者グループは、ランダムな順序でタスクを行なった。ランダム化には、セッションの順序と各セッション内のタスクの順序の両方が含まれている。ただし、参加者が十分にリラックスできるよう、レストタスクは主要セッション（対面と遠隔）のそれぞれにおいて、必ず最初または最後に配置された。

レストタスクを除くすべてのタスクでは、参加者は特定のイソップ寓話について話し合うよう指示された。各タスクの開始時には、参加者に用意された寓話を読んでもらい、その内容について 3 分間の会話中に議論するよう説明した。各タスク終了後、参加者はイヤホンを外し、個別に

表 1 実験タスクの設置.

セッション	タスク	遅延 (ms)
対面	会話	-
	レスト	-
遠隔	会話	0
	会話	150
	会話	300
	会話	450
	会話	600
	レスト	-

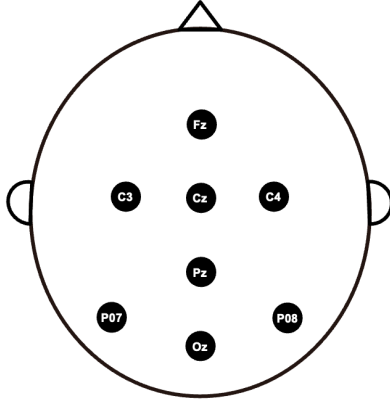


図 6 デバイスには、頭皮に均等に配置された 8 つの電極が搭載されている。

会話中に違和感を感じたかどうかを確認した。全実験終了後には、両参加者が同じ部屋に戻り、実験中に設定された遅延について説明を受けたうえで、遅延に気づいたか、また遅延の違いを感じたかどうかを再度尋ねた。

3.4 EEG データ解析

EEG データは、2 つの Unicorn Hybrid Black ヘッドセット (g.tec Medical Engineering, オーストリア) を使用して同時に記録された。このデバイスには 10/20 システムに従い、Fz, C3, Cz, C4, Pz, PO7, Oz, PO8 の 8 つの電極が配置されている (図 6)。実験中、頭皮全体の神経活動を取得するため、電極の位置は均等に配置された。信号は 250Hz のサンプリングレートで収集された。Unicorn Hybrid Black ヘッドセットはドライ (ジェル不使用) およびウェット (ジェル使用) の両方で使用可能だが、実験中は取得される EEG データの品質を維持するため、ウェットの状態で使用された。

3.4.1 前処理

EEG データは、MATLAB (2023b, The MathWorks Inc.) の EEGLAB ツールボックス (v2024.0) とカスタムスクリプトを使用して前処理された。まず、記録された信号に 2~30Hz のバンドパスフィルタが適用された。その後、各ペアの EEG データは、参加者ごとに個別のファイルに分割された。次に、元の 3 分間のデータから、PREP パイプ

ライン [26] を使用してバッドチャンネルの検出数が最も少ないセグメントを選択した。この処理により、各試行のデータから 1 分間が除外され、最終的に 2 分間のデータが残された。PREP パイプラインは、バッドチャンネルの検出と補間にも使用された。データは次に、オーバーラップなしで 5 秒ごとのエポックに分割された。最後に、各参加者のデータに対して adaptive mixture independent component analysis (AMICA) が実行された。

3.4.2 同期解析

脳間同期は、両参加者の EEG 信号から PLV を用いて定量化された。PLV は、異なる脳領域間の同期を評価するために、EEG データ解析で広く用いられる手法である。本研究では、各参加者の 8 つの EEG チャンネルすべてを使用し、結果として 64 のチャンネルペアが分析に使用された。PLV を用いた定量化手法は、Lachaux ら [27] によって詳述されたアプローチに基づいており、以下の式で計算される：

$$PLV = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=1}^N e^{j\theta(t,n)} \right|$$

ここで、 $\theta(t, n)$ は n 回の試行中の時点 t における、2 つの EEG 信号間の位相差 $\phi_1(t, n) - \phi_2(t, n)$ である。脳波データの PLV を計算するために、EEG 信号はまずベータ周波数帯 (13.5~29.5Hz) でフィルタリングされ、これはテクノロジー支援コミュニケーション中の脳間同期に関する過去の研究と一致させた [12]。このフィルタリングは有 finite impulse response (FIR) フィルタを使用して行い、フィルタリング後にヒルベルト変換を適用した。その後、PLV は試行間の 64 ペアの EEG 信号 (8 チャンネル $\times$ 8 チャンネル) の位相差を算出し、選択された試行にわたって各チャンネルペアの位相差を平均することで計算された。得られた PLV 値は 0 から 1 の範囲であり、1 は信号間の完全な位相同期を示し、0 は同期がないことを示す。高い PLV 値は脳領域間の強力な機能的接続を示し、協調的な神経コミュニケーションを反映する。一方、低い PLV 値は同期の欠如を示し、神経相互作用における潜在的な障害を示唆している。このプロセスにより、脳領域間の位相同期の一貫性を反映する PLV 値が得られ、実験条件下での脳波同期の解析が可能となった。

3.4.3 統計解析

実データから得られた PLV 値を評価するため、まずサロゲートデータを生成し、パーミュテーションテストを用いて分析を行った。サロゲートデータは、同じペア内の参加者同士を、実際のタイミングとは対応しないようにペアリングして作成した。具体的な方法は、参加者 A の EEG データのエポック順をシャッフルし、参加者 B のエポック順と異なるように組み合わせる。例えば、参加者 A の最初のエポック信号を、参加者 B の 9 番目のエポック信号と対応させる、といった具合である。実データとサロゲート

表 2 実際のデータとサロゲートデータを比較した結果.

セッション	タスク	P-value
対面	会話	0.0001
	レスト	0.9053
遠隔	0 ms	0.0001
	150 ms	0.0002
	300 ms	0.0001
	450 ms	0.9996
	600 ms	0.7141
	レスト	1.0000

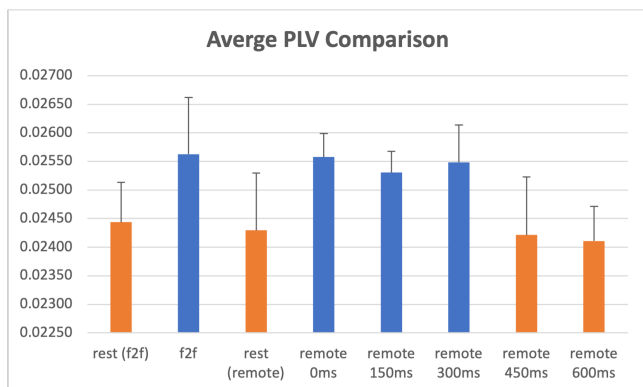


図 7 各条件における平均 PLV. 異なる実験条件における脳間同期を比較するために、各条件における平均 PLV を計算した. 最も低い平均 PLV は、遠隔コミュニケーションの高遅延条件 (≥ 450 ms, $PLV = 0.02416$) で観察され、次に遠隔環境のレスト条件 ($PLV = 0.02416$) および対面環境のレスト条件 ($PLV = 0.02563$) が続いた. 最も高い平均 PLV は、対面コミュニケーション条件 ($PLV = 0.02563$) で見られ、遠隔コミュニケーションの低遅延条件 (≤ 300 ms, $PLV = 0.02546$) との差はわずかであった.

データを比較し、その統計的有意性を検証するため、ノーマリティの仮定を必要としないことから、EEG データ解析に適したパーミュテーションテストを使用した [28]. 各テストに対して 10,000 回のパーミュテーションを実施し、データを複数回シャッフルすることで可能な結果の分布を生成した. サロゲートデータとのこの比較は、過去の脳間研究 [19] [12] と一致し、観測された神経結合が偶然の一致ではなく真の脳間同期を反映しているかどうかを評価するものである.

対面コミュニケーションと特定の遅延条件 (0 ms, 150 ms, 300 ms, 450 ms, および 600 ms) の遠隔コミュニケーション間での脳間同期を比較するために、Kruskal-Wallis test を使用し、その後に多重比較を行った. このアプローチにより、対面コミュニケーションと各遅延条件の差異が統計的に有意かどうかを判断し、遠隔コミュニケーションにおける遅延が脳間同期にどのように影響を与えるかについて、より詳細な理解が得られた.

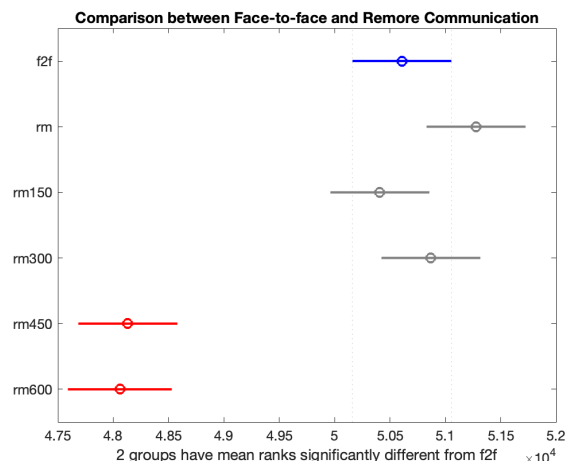


図 8 多重比較の結果. 450 ms 以上の遅延がある遠隔コミュニケーション (レッド) は、対面コミュニケーションと比較して PLV が有意に低かった. 一方、300 ms 未満の遅延では、PLV は対面コミュニケーションとほぼ同等であった. この図の X 軸は、Kruskal-Wallis 検定の結果に基づく、各条件の平均順位を示していて、各条件間での統計的な差異を評価するためのものである.

4. 評価

4.1 脳間同期の実データとサロゲートデータの比較

対面コミュニケーション、異なる遅延条件での遠隔コミュニケーション、及び、レストタスクを含むすべての条件において、実データとサロゲートデータの差異をパーミュテーションテストを用いて分析した (表 2). 両方のレストタスクにおいて、環境に関係なく (対面または遠隔)、パーミュテーションテストの結果が有意ではなかったため ($p > 0.025$), レストタスクに有意な脳間同期が発生していなかったことが示されている. 平均 PLV の比較 (図 7) から、レスト状態では PLV が比較的に低いことが示されている. 対照的に、いくつかのコミュニケーション条件においては、有意な脳間同期が観察された. 対面コミュニケーションでは、 p 値は 0.025 より低く、強い神経同期を示している. また、遠隔コミュニケーションにおいても、遅延なし (0 ms) および 150 ms, 300 ms の遅延条件での分析は統計的に有意な結果となった ($p < 0.025$). 450 ms と 600 ms というより長い遅延では PLV の差が有意ではなかった ($p > 0.025$). これは、遅延が長くなるにつれて同期が著しく阻害されることを示した. これらの結果は、通信遅延が十分に高い場合、脳間同期が中断されることを示唆している.

4.2 実験条件における脳間同期の比較

対面コミュニケーションと異なる遅延条件 (0 ms, 150 ms, 300 ms, 450 ms, および 600 ms) の遠隔コミュニケーションを比較するために、Kruskal-Wallis test を実施した.

その結果、コミュニケーション条件が PLV 値に対して全体的に有意な影響を与えることが示された ($\chi^2(5) = 199.19$, $p < 0.025$)。この結果は、脳間同期が異なるコミュニケーション環境から影響を受けることを示している。

Kruskal-Wallis test に続いて、対面コミュニケーションと異なる条件間の差異を評価するために多重比較が行われた (図 8)。その結果、450 ms および 600 ms の遅延条件では、対面コミュニケーションと比較して有意に低い神経同期レベルが観察された (両者とも $p < 0.025$)。一方、0 ms, 150 ms, および 300 ms の条件では対面コミュニケーションとの有意な差異は見られなかった ($p > 0.025$)。これにより、短い遅延 (0 ms から 300 ms まで) の範囲では、遠隔コミュニケーションにおいて脳間同期が対面コミュニケーションと同等のレベルで維持される可能性が示唆された (図 8)。これらの結果は、通信遅延が脳間同期に与える影響に関する仮説を支持しており、450 ms および 600 ms 以上の遅延が同期を著しく阻害することを示している。

4.3 インタビュー

本研究では、遠隔コミュニケーション中に各タスク終了後に行われたインタビューと、実験全体終了後に行われたインタビューの 2 種類を実施した。両方のインタビューでは、主に参加者の遅延に対する経験に焦点を当てた。

4.3.1 タスク後のインタビュー

タスク後のインタビューでは、22 人中 8 人の参加者が高遅延条件中に遅延を感じたと報告した。うち 3 人の参加者は特に 600 ms 条件で遅延に気づき、他の 5 人の参加者は 450 ms および 600 ms の両条件で遅延を感じたと述べた。参加者は遅延により意図しない割り込みが発生し、相手が話し始めるタイミングを予測するのが難しくなったと説明した。例えば、参加者 8 は「少し遅延があり、会話中に言葉がかぶることがありました」と 600 ms 遅延条件で述べ、参加者 16 は「他の参加者が私の反応を聞いたとき、遅延を感じました」と述べた。これらのコメントは、高遅延条件下で人工的な遅延が会話の自然な流れを阻害したことを示している。

4.3.2 実験全体終了後のインタビュー

実験後のインタビューでは、タスク後のインタビューで遅延を感じたと報告しなかった 14 人のうち 4 人が、実際には遅延に気づいていたが、遠隔コミュニケーションにおける通常の現象と認識しており、その時点では問題と感じなかったと述べた。参加者 3 は「遠隔コミュニケーション中に遅延があるのは普通だと思っていました」と述べた。一方、残りの 7 人の参加者はタスク後のインタビューと同じく、試行中に遅延を感じなかったと報告していた。

全体的に、参加者のほぼ半数 ($n = 10$) はコミュニケーション中に遅延を感じなかったが、一部の参加者は遅延を遠隔コミュニケーションに固有の現象と考えていた。この

ような経験の違いは、参加者がコミュニケーション遅延に対して異なる感受性を持っていることを示唆している。

遅延以外にも、参加者は遠隔コミュニケーション中に他の不快感も報告しており、たとえば目を合わせることの難しさやボディランゲージの欠如が挙げられた。参加者 6 は「カメラとモニターの位置が違うので、目を合わせるのが難しいです」と述べ、参加者 13 は「対面コミュニケーションに比べて、ボディランゲージが少ないと感じました」と述べた。

5. 議論

本研究は、遠隔コミュニケーションにおける信号処理を除く通信遅延が脳間同期に与える影響を調査し、対面コミュニケーションと比較したものであり、PLV を主な指標として用いた。結果から、脳間同期は対面および低遅延 (≤ 300 ms) の遠隔条件の両方で確認された一方、通信遅延が 450 ms を超えると中断されることが示された。興味深い点として、低遅延の遠隔条件での PLV 値が対面インタラクションと類似しており、レストタスクでは両環境ともに低い PLV 値を示した。また、インタビュー結果から、通信遅延に対する経験が異なることが判明し、一部の参加者は遅延を感じなかった一方で、他の参加者は遅延を顕著で煩わしいと感じたことが明らかになった。

実データとサロゲートデータの比較では、対面コミュニケーションと低遅延 (≤ 300 ms) の遠隔コミュニケーション中の神経同期が有意であった。一方、高遅延条件 (≥ 450 ms) で脳間同期が顕著に低下したため、脳間同期を乱す通信遅延の程度には閾値が存在すると考えられる。この結果は、450 ms を超える通信遅延が神経同期を損なうことによって、コミュニケーションの質に悪影響を及ぼすことを示している。

各条件の PLV 値の比較も、これらの結論を裏付けるものである。対面および遠隔環境でのレストタスクに見られた類似の PLV 値は、非活動時には同期が低いことを示し、参加者が積極的にコミュニケーションをとっていない場合には物理的な近接が同期を強化しないことを示唆する。対面と低遅延の遠隔条件間の PLV 値の類似性は、遠隔コミュニケーションが脳波同期の観点から対面インタラクションの自然な流れを模倣し得ることを示す結果であり、対面コミュニケーションが神経同期を促進するという先行研究 [9] [10] [11] を裏付けると同時に、遅延が 300 ms 未満に抑えられている場合には遠隔インタラクションでも同様のレベルの同期が維持され得るという新たな洞察も提供している。一方、高遅延条件 (≥ 450 ms) と対面コミュニケーションの間に見られる顕著な差異は、通信遅延が十分に大きくなるとインタラクションの自然なリズムが乱れ、神経同期が崩壊し、コミュニケーションの質が低下する可能性があることを示している。

インタビューから報告された通信遅延に対する反応の違いは、参加者の通信遅延に対する感受性が異なる可能性を示唆する。遠隔コミュニケーション中、過半数の参加者 ($n = 12$) が遅延を認識した一方で、8人は遅延が会話の自然な流れを妨げ、煩わしいと感じていたが、他の参加者は気にしていなかった。また、一部の参加者は遅延を感じなかった。この反応の違いは、オンラインコミュニケーションへの慣れや、タスクの具体的な状況、あるいは認知処理における個人的な違いなどの要因に由来する可能性がある。これらの結果は、通信システムの設計においてユーザーの体験を理解することの重要性を示しており、遅延耐性はユーザーごとに大きく異なる可能性があることを示している。

興味深い点として、脳間同期は通信遅延が 450 ms を超えると乱れた一方で、一部の参加者は 600 ms の条件でのみ遅延を感じたことが明らかになった。これは、参加者が遅延を意識的に認識しない場合でも、脳間同期が乱れている可能性を示唆しており、脳間同期がユーザーが常に認識しない微妙な障害を検出できる、客観的なコミュニケーション品質の指標としての可能性を示している。

総じて、本研究の結果は、脳間同期が遠隔インタラクションにおけるコミュニケーション品質の重要な指標となり得るという仮説を支持している。特に、通信遅延が 450 ms を超えた場合、神経同期が通信遅延に非常に敏感であることから、脳間同期を測定することで遠隔コミュニケーションシステムの効果を評価するための有意義な指標が提供される可能性がある。さらに、脳間同期は遅延の影響だけでなく、遠隔コミュニケーションの質と効果に寄与する主要な要因を特定する手段としても機能する可能性がある。

6. 制約と展望

本研究にはいくつかの制約があり、今後の研究で取り組むべき点が挙げられる。まず、サンプルサイズが比較的小さいため、実施された統計分析は有意であったものの、結果の一般化が制限される可能性がある。さらに、個々の EEG チャンネルレベルでの同期の違いを分析しておらず、より微細な脳間同期のパターンが明らかになった可能性も考えられる。よって、チャンネルレベルで詳細な同期を調査することで、特定の脳領域における異なる遅延条件下でのコミュニケーションの影響と新たな洞察を得られる可能性がある。

もう 1 つの制約は、本実験で使用された遅延の制御された性質が挙げられる。本研究では固定された通信遅延に焦点を当てたが、現実世界の遠隔コミュニケーションでは、時間の経過とともに予測不可能な変動を伴う遅延が一般的に生じる。例えば、ネットワークの変動により遅延が突然増加または減少することがあるが、このような要素は本研究の制御された設定ではシミュレートされていない。これらの突然の遅延の変動は、脳間同期に異なる影響を与える

可能性がある。今後の研究では、より動的な現実世界のシナリオ (“in-the-wild”) を探索し、予測不可能な遅延が脳間同期にどのように影響するか、特に遅延が突然増加する場合についてより深く理解することが重要である。

さらに、本研究では遠隔コミュニケーションにおいて脳間同期に影響を与える可能性のある他の要因を考慮していない。先行研究では、ビデオ会議中に不快感を引き起こす要素として、過剰な視線、認知負荷、自分の映像を常に見ることによる自己評価、そして移動の制限などが挙げられている [5]。本研究で行ったインタビューでも、参加者が遠隔コミュニケーション中に自然なアイコンタクトを取れないことなどの不快感を経験したことが明らかになっている。これらの要素は、特に長時間のインタラクション中に神経同期に影響を与える可能性が高い。したがって、今後の研究ではこれらの要因の影響を検討することが重要である。

最後に、今後の研究では、遠隔コミュニケーション中に観察された脳間同期の乱れを軽減するためのフィードバックメカニズムの開発に焦点を当てることが考えられる。遠隔コミュニケーションの質を向上させるには、脳間同期を定量的な主要指標として活用することが有益となる可能性がある。1つの方向性としては、同期状態に関するリアルタイムのフィードバックをユーザーに提供する、または観察された脳間同期パターンに基づいて動的に調整する適応システムを開発することが考えられる。これらの戦略は、コミュニケーションの質を維持し、高遅延が遠隔協働に与える悪影響を軽減するのに役立つ可能性がある。

7. 結論

本研究は、遠隔コミュニケーションにおける脳間同期に関する研究の発展に貢献しており、脳間同期が遠隔コミュニケーション中にも発生するが、通信遅延の程度に大きく依存していることを示した。信号処理を除く、450 ms を超える通信遅延は同期を著しく阻害する一方で、低遅延の遠隔コミュニケーションでは、対面コミュニケーションに匹敵するレベルの神経同期が達成できることが明らかとなった。これらの結果は、脳間同期をコミュニケーションの質を評価するツールとして活用する可能性を示しており、通信遅延を減らすことが遠隔コミュニケーション技術の開発において重要な焦点となるべきであることを示唆している。

謝辞

本研究は JST ムーンショット型研究開発事業グラント番号 JPMJMS2012、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務 (JPNP23025) の支援を受けたものです。

参考文献

- [1] Sumita Raghuram, N. Sharon Hill, Jennifer L. Gibbs, and Likoebe M. Maruping. Virtual work: Bridging research clusters. *Academy of Management Annals*, 13(1):308–341, 2019.
- [2] Pamela J Hinds and Sara Kiesler. *What Do We Know about Proximity and Distance in Work Groups? A Legacy of Research*, pages 57–81. MIT Press, 2002.
- [3] Michael Argyle. *Bodily communication*. Routledge, 2013.
- [4] Alex Pentland. The new science of building great teams. *Harvard business review*, 90(4):60–69, 2012.
- [5] Jeremy N. Bailenson. Nonverbal Overload: A Theoretical Argument for the Causes of Zoom Fatigue. *Technology, Mind, and Behavior*, 2(1), feb 23 2021.
- [6] Chang S. Nam, Sanghyun Choo, Jiali Huang, and Jiyoung Park. Brain-to-brain neural synchrony during social interactions: A systematic review on hyperscanning studies. *Applied Sciences*, 10(19), 2020.
- [7] Guillaume Dumas, Jacqueline Nadel, Robert Soussignan, Jacques Martinerie, and Line Garnero. Inter-brain synchronization during social interaction. *PLOS ONE*, 5:1–10, 08 2010.
- [8] Brent A. Kelsen, Alexander Sumich, Nikola Kasabov, Sophie H.Y. Liang, and Grace Y. Wang. What has social neuroscience learned from hyperscanning studies of spoken communication? a systematic review. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 132:1249–1262, 2022.
- [9] Pavlo D Antonenko, Robert Davis, Jiahui Wang, and Mehmet Celepkolu. On the same wavelength: Exploring team neurosynchrony in undergraduate dyads solving a cyberlearning problem with collaborative scripts. *Mind, Brain, and Education*, 13(1):4–13, 2019.
- [10] Frank A Fishburn, Vishnu P Murty, Christina O Hlutkowsky, Caroline E MacGillivray, Lisa M Bemis, Meghan E Murphy, Theodore J Huppert, and Susan B Perlman. Putting our heads together: interpersonal neural synchronization as a biological mechanism for shared intentionality. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 13(8):841–849, 08 2018.
- [11] Lotte Schoot, Peter Hagoort, and Katrien Segaert. What can we learn from a two-brain approach to verbal interaction? *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 68:454–459, 2016.
- [12] Linoy Schwartz, Jonathan Levy, Yaara Endevelt-Shapira, Amir Djalovski, Olga Hayut, Guillaume Dumas, and Ruth Feldman. Technologically-assisted communication attenuates inter-brain synchrony. *NeuroImage*, 264:119677, 2022.
- [13] Valtteri Wikström, Katri Saarikivi, Mari Falcon, Tommi Makkonen, Silja Martikainen, Vesa Putkinen, Benjamin Ultan Cowley, and Mari Tervaniemi. Inter-brain synchronization occurs without physical co-presence during cooperative online gaming. *Neuropsychologia*, 174:108316, 2022.
- [14] Julie E Boland, Pedro Fonseca, Ilana Mermelstein, and Myles Williamson. Zoom disrupts the rhythm of conversation. *Journal of Experimental Psychology: General*, 151(6):1272, 2022.
- [15] Erik Peper, Vietta Wilson, Marc Martin, Erik Rosegard, and Richard Harvey. Avoid zoom fatigue, be present and learn. *NeuroRegulation*, 8(1):47–47, 2021.
- [16] Nerys Williams. Working through covid-19: ‘zoom’ gloom and ‘zoom’ fatigue. *Occupational Medicine*, 71(3):164–164, 2021.
- [17] Priyanka A Abhang, Bharti W Gawali, and Suresh C Mehrotra. *Introduction to EEG-and speech-based emotion recognition*. Academic Press, 2016.
- [18] Mohammad Shehata, Miao Cheng, Angus Leung, Naotsugu Tsuchiya, Daw-An Wu, Chia-huei Tseng, Shigeki Nakauchi, and Shinsuke Shimojo. Team flow is a unique brain state associated with enhanced information integration and interbrain synchrony. *eNeuro*, 8(5), 2021.
- [19] Alejandro Pérez, Manuel Carreiras, and Jon Andoni Duñabeitia. Brain-to-brain entrainment: Eeg interbrain synchronization while speaking and listening. *Scientific reports*, 7(1):4190, 2017.
- [20] Ihshan Gumilar, Ekansh Sareen, Reed Bell, Augustus Stone, Ashkan Hayati, Jingwen Mao, Amit Barde, Anubha Gupta, Arindam Dey, Gun Lee, and Mark Billinghurst. A comparative study on inter-brain synchrony in real and virtual environments using hyperscanning. *Computers & Graphics*, 94:62–75, 2021.
- [21] Yafeng Pan, Xiaojun Cheng, Zhenxin Zhang, Xianchun Li, and Yi Hu. Cooperation in lovers: an f nirs-based hyperscanning study. *Human brain mapping*, 38(2):831–841, 2017.
- [22] Vanessa Reindl, Christian Gerloff, Wolfgang Scharke, and Kerstin Konrad. Brain-to-brain synchrony in parent-child dyads and the relationship with emotion regulation revealed by fnirs-based hyperscanning. *NeuroImage*, 178:493–502, 2018.
- [23] Mihir Mody, Pramod Swami, and Pavan Shastry. Ultra-low latency video codec for video conferencing. In *2014 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT)*, pages 1–5, 2014.
- [24] Shrikant Garg, Ayushi Srivastava, Mashhuda Glencross, and Ojaswa Sharma. A study of the effects of network latency on visual task performance in video conferencing. In *Extended Abstracts of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA ’22, New York, NY, USA, 2022. Association for Computing Machinery.
- [25] Katrin Schoenenberg, Alexander Raake, and Judith Koeppel. Why are you so slow? – misattribution of transmission delay to attributes of the conversation partner at the far-end. *International Journal of Human-Computer Studies*, 72(5):477–487, 2014.
- [26] Nima Bigdely-Shamlo, Tim Mullen, Christian Kothe, Kyung-Min Su, and Kay A Robbins. The prep pipeline: standardized preprocessing for large-scale eeg analysis. *Frontiers in neuroinformatics*, 9:16, 2015.
- [27] Jean-Philippe Lachaux, Eugenio Rodriguez, Jacques Martinerie, and Francisco J Varela. Measuring phase synchrony in brain signals. *Human brain mapping*, 8(4):194–208, 1999.
- [28] Phillip Good. *Permutation tests: a practical guide to resampling methods for testing hypotheses*. Springer Science & Business Media, 2013.