

オノマトペを用いた脳波制御訓練手法による魔法ゲームシステム

二瓶 朝涉^{*†} 平野 怜旺^{*‡} 渡邊 恵太[†]

概要. ブレインコンピュータインターフェイス (BCI) は、脳と外部機器の直接通信を可能にする技術である。脳波 (EEG) ベースの非侵襲型 BCI は、主に医療用途に利用されるが、ビデオゲームへの利用にも関心が高まっている。BCI を使ったビデオゲームは、プレイヤーに斬新で魅力的なモダリティを提供し、ゲームへの没入感を高める可能性がある。本研究では、オノマトペを用いた脳波制御訓練手法により、心的イメージで魔法を制御するビデオゲームを開発した。本システムでは、ユーザは BCI を装着し、魔法の視覚イメージとオノマトペを用いた発話イメージを同時に想起することで、魔法を操作することができる。本稿では、制御パフォーマンスとビデオゲームの体験の両方を評価することにより、本手法の有用性を検証した。その結果、本手法が BCI 制御において一定の制御性能を示し、ビデオゲーム体験の向上に有用である可能性を示唆した。また、ゲームへの没入感や楽しさについても高い評価を得た。

1 はじめに

ブレインコンピュータインターフェイス (BCI) は、ニューラルインターフェイスやブレインマシンインターフェイス (BMI) とも呼ばれ、脳と外部機器との直接通信を可能にする [11]。脳波ベースの非侵襲型 BCI [9] は、リハビリテーション [3, 13] や車椅子制御 [16]、コミュニケーション支援 [4] などの医療用途に利用されることが多く、運動機能障害を持つユーザでも外部機器を制御し、インタラクションを可能にする [15]。一方、健常者のための BCI への関心も高まっており、ビデオゲームへの応用も注目されている。BCI を用いたビデオゲーム体験は、プレイヤーにとって斬新で面白いモダリティを感じさせることや、ゲームへの没入感の向上 [19, 17] をもたらす可能性がある。しかし、この技術が一般に受け入れられるためには、ユーザビリティとユーザ体験を考慮した BCI システムを設計する必要がある [14]。

BCI を用いたビデオゲーム制御において、運動イメージによる制御が一般的なパラダイムである [18]。運動イメージは BCI パフォーマンスが安定しやすく、一般的な手法であるが、イメージ想起が難しいことや、ユーザの運動イメージと画面上の視覚的なフィードバックに乖離がある場合、直感的な操作性が損なわれる [1, 8]。一方、視覚イメージによる制御は直感的な操作が可能であるが、BCI パフォーマンスが安定しないため、プレイヤーが意図した操作を正確に反映することが難しく、ビデオゲーム体験の質を低下させる問題がある [7]。

平野らは、オノマトペを用いた脳波制御訓練手法

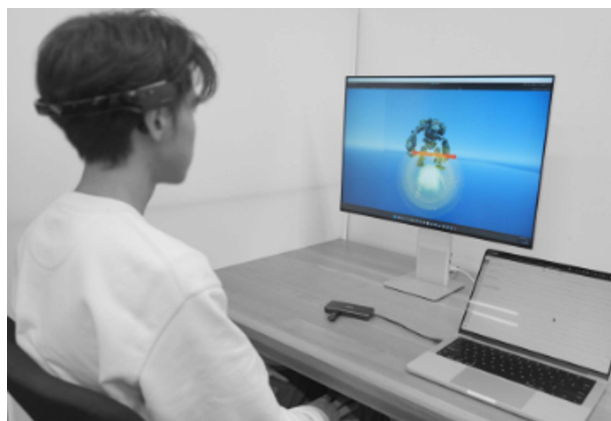


図 1. オノマトペを用いた脳波制御訓練手法により魔法制御できるビデオゲームを開発した。ユーザは、魔法の視覚イメージとそれに対応するオノマトペによる発話イメージを同時に想起することにより魔法を制御できる。

を提案した [23]。オノマトペには、構成する音と意味の間に密接な結びつきがある音象徴性と呼ばれる性質があり、直感的な理解や感覚的なイメージを与えることができる [6]。この手法では、発話イメージをオノマトペで表現し、視覚イメージとオノマトペによる発話イメージを同時に想起するマルチモーダルなアプローチにより、BCI パフォーマンス向上と認知負荷軽減の可能性を示した。例えば、画面上に表示されたキューブを脳波制御により回転させる時、キューブが回転する視覚イメージと同時に「クルクル」という回転に関連するオノマトペを繰り返して想起する。視覚イメージのみの脳波制御は不安定だが、オノマトペによる発話イメージと組み合わせることで、特定の脳波パターンを強化できる。また、本手法を用いることにより、ビデオゲームや UI 操

Copyright is held by the author(s).

* Authors contributed equally.

† 明治大学総合数理学部

‡ 明治大学大学院先端数理科学研究科



図 2. BCI を用いてイメージ制御により魔法を發動し、敵を攻撃するゲーム。画面中央部には敵と体力を示すゲージを表示し、画面下部には發動した魔法を表示した。

作において、実現可能なインタラクションとその応用可能性について検討した [22].

本研究では、オノマトペを用いた脳波制御訓練手法により魔法制御できるビデオゲームを開発した (図 1). ユーザは、魔法の視覚イメージとそれに対応するオノマトペによる発話イメージを同時に想起することにより魔法を制御する (図 2). 例えば、炎の魔法を生成するには、ユーザは心的イメージで炎を視覚化し、日本語のオノマトペ「メラメラ」を繰り返す脳内で唱える。

本稿では、制御パフォーマンスとゲーム体験を評価することにより、本手法が BCI 制御のビデオゲーム体験を向上させる可能性を検証した。その結果、本手法は参加者が 60% 以上意図した通りに魔法を制御できたことから、一定の制御性能を示した。また、ゲームへの没入感や楽しさについて高い評価を得たことから、BCI を用いたイメージ制御とオノマトペの高い親和性がプレイヤー体験を向上させる可能性があることを示唆した。

2 ゲームシステム

2.1 システム構成

本システムでは、EMOTIV EPOC X¹ を用いて脳波計測を行い、MATLAB を用いて脳波解析を行った。また、Unity を用いてリアルタイムに脳波で制御可能なゲームを開発した。EPOC X は、頭皮からの電気信号を記録する 16 個のセンサー (内 2 個はリファレンス) を搭載しており、導電性を向上させるために生理食塩水で浸したフェルトを各センサーに取り付けている (図 3)。本研究では、サンプリング周波数を 256Hz に設定し、脳波データを計測した。

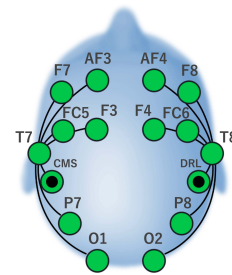


図 3. EPOTIV EPOC X と各センサー配置を示す。EPOC X は、頭皮からの電気信号を記録するために 16 個のセンサーを搭載し、センサー位置は国際的な 10-20 システムに準拠する (センサー構成: AF3, F7, F3, FC5, T7, P7, O1, O2, P8, T8, FC6, F4, F8, AF4)。

取得した脳波データは、無線通信によりコンピューターに送信し、MATLAB 上で解析を行った。データの前処理、特徴抽出、特徴分類の一連の処理をリアルタイムに実行するシステムを、MATLAB 上で実装し、MATLAB 上で分類した結果は、UDP 通信により Unity に送信する。そして、Unity では受信した分類結果に基づいてアプリケーションを制御するシステムを構築した。本研究では、Unity 上で魔法ゲームを実装し、プレイヤーは脳波制御によりシステムをリアルタイムに操作し、視覚的なフィードバックを受けつつゲームをプレイした (図 4)。

2.2 BCI システム

2.2.1 前処理

本研究では、MATLAB (2020b: MathWorks) を用いて脳波データの解析を行った。まず、実験で計測した生脳波データに対して前処理を行うために、1-40Hz の範囲でバンドパスフィルタを作成した。そして、設計したバンドパスフィルタを各チャンネルの脳波データに適用し、脳波データからノイズ成分を軽減した。フィルタリング後、刺激に対する脳の反応を特定するために、各刺激に対応するエポックに分割し、収集した脳波データを正確に解析した。

2.2.2 特徴抽出

特徴抽出には、共通空間パターン (Common Spatial Pattern: CSP) アルゴリズムを用いて行った。CSP は脳波データ解析において広く用いられる信号処理技術であり、2 つの異なるクラス間の差異を強調し、脳波の変動を最大限に分離する空間フィルターを作成できる [2]。このプロセスでは、各脳波データに対し、共分散行列の固有値分解を行うことにより、信号の分散を最大化し、各脳波データを最大限分離する。得られた固有ベクトルは CSP フィルターとして機能し、最も分類性能が高い固有ベク

¹ <https://www.emotiv.com/epoc-x/>

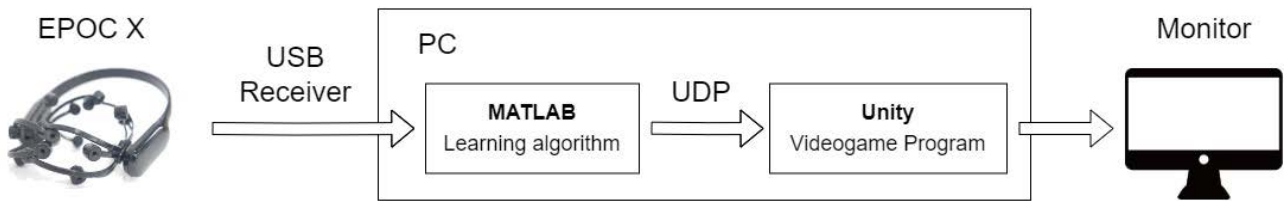


図 4. システム構成図. EMOTIV EPOC X で計測した脳波データは、無線通信によりコンピューターに送信し、MATLAB 上で解析を行った. MATLAB 上で特徴分類した結果は、UDP 通信により Unity に送信する. そして、Unity では受信した分類結果に基づいてアプリケーションを制御するシステムを構築した.

トルを選択することにより、元の脳波データより少ない次元で情報を抽出できるため、機械学習モデルの入力として非常に有効である [12]. そして、CSP フィルターをデータに適用した後、対数分散特徴量を計算した. この対数分散は、機械学習モデルへの入力に利用されることが多く、元のデータの分散を対数スケールで表現することにより、異なるデータソースやセンサーからの信号比較が容易になる.

本研究では、各エポックに対して一定の時間窓を設定し、この時間窓を移動することにより、元のデータから複数のサンプルを得た. 時間窓を 2 秒間、オーバーラップを 25% (0.5 秒間) に設定し、元のデータから多様なサンプルを生成した. この時間窓の設定により、データセットを拡大し、特徴抽出の精度を向上させることができる. そして、このように作成したデータセットに対し、CSP フィルターを作成、適用して特徴量を抽出した. また、リアルタイムでの解析においても同様に、2 秒間の脳波データに対し、事前トレーニングで作成した CSP フィルターを適用することで特徴抽出を行った.

2.2.3 特徴分類

特徴分類では、サポートベクターマシン (Support Vector Machine : SVM) を用いて抽出した特徴量の分類を行った. SVM は、特徴空間内で異なるクラスを区分する最適な境界線、すなわち超平面を見つけるために設計された教師あり学習アルゴリズムである [5]. このアルゴリズムは、クラス間のマージンを最大化することを目的としている. さらに、SVM は線形分離可能でないデータセットに対しても効果的であり、元の特徴空間をより高次元の空間にマッピングし、線形分離を可能にする. 本システムでは、SVM を用いてリアルタイム BCI システムを開発した. SVM による分類結果を毎秒出力し、その出力結果を用いてアプリケーションを制御できるように設計した.

2.3 ゲームシステム

本研究では、BCI を用いたイメージ制御によって魔法を発動し、敵を攻撃するゲームを Unity で開発した. 画面中央部には敵と体力を示すゲージを表示

表 1. 実験前アンケートの内容. 炎魔法のオノマトペは「メラメラ」、電気魔法のオノマトペは「パチパチ」に決定した.

(1)	オノマトペを用いることで視覚イメージがより鮮明になったか
(2)	オノマトペが視覚イメージを想起しやすいものであったか?
(3)	オノマトペが視覚イメージとマッチしていたか?
(4)	オノマトペを発話イメージしやすかったか?
(5)	オノマトペの発話リズムが視覚イメージのリズムと一致していたか?
(6)	総合的にそのオノマトペは視覚イメージに適していたか?

し、画面下部には発動した魔法を表示した. 敵は草属性または水属性を持ち、ランダムに出現する.

ユーザは、心的イメージ制御により炎魔法と電気魔法を発動することができる. BCI システムから、ユーザのイメージの分類結果の入力は 1 秒に 1 回受信し、受信した入力の魔法は 1 段階大きくなる. 一方、既に発動している魔法とは異なる入力を受け取ると 1 段階小さくなる. 魔法は最大 2 段階まで大きくなり、最大サイズになると自動で発射され、敵に攻撃できる. また、攻撃によるダメージは、魔法の種類と敵の属性により決定し、魔法の種類と敵の属性に応じて効果的な魔法で攻撃すると、より高いダメージを与えることができる. 例えば、草属性の敵に炎魔法で攻撃すると、すべての体力ゲージを減らすことができるが、電気魔法で攻撃すると 1/4 しか減らすことができない. 同様に、水属性の敵に電気魔法で攻撃すると、すべての体力ゲージを減らすことができるが、炎魔法で攻撃すると 1/4 しか減らすことができない. さらに、魔法発射後、次の魔法が発動できるようになるまで 3 秒のインターバルを設けることで、ユーザのイメージをリセットする時間を確保した. これにより、プレイヤーは次の魔法発動に集中できる.

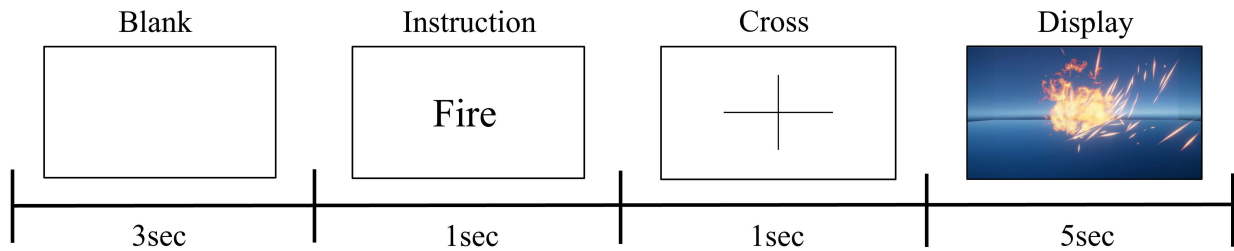


図 5. 動画の指示に従いながらイメージ想起を繰り返すトレーニングを行った。トレーニング動画は、安静 3 秒、指示 1 秒、合図 1 秒、イメージ想起 5 秒のサイクルを繰り返す構成になっている。

3 実験

3.1 事前調査

実験において、炎魔法と電気魔法の制御に最適なオノマトペを選定するために、我々は日本語オノマトペ辞典 [21] から選定した各魔法 5 種類のオノマトペを対象に、イメージ想起に関するアンケートを行った (表 1)。アンケートでは、参加者は魔法が発動している様子の動画を視聴しつつ、魔法の視覚イメージと同時にオノマトペによる発話イメージを想起した。

その後、各オノマトペについて魔法イメージの鮮明さ、想起のしやすさ、視覚イメージとの一致度に関するアンケートを 7 段階リッカート尺度を用いて行った。アンケートは 15 人が回答し、取得したデータを処理した結果、炎魔法のオノマトペは「メラメラ」、電気魔法のオノマトペは「バチバチ」に決定した。

3.2 実験参加者

参加者は 7 名 (男性 6 名、女性 1 名、年齢:19-23) の大学生であった。参加者の 1 名は BCI デバイスの使用経験があったが、それ以外の 6 名は BCI の使用経験がなかった。参加者のプライバシーを最大限に尊重し、すべての個人情報は匿名化して保管した。参加者のデータは研究者の間でのみ共有し、それ以外の第三者とは共有しなかった。

3.3 実験手順

本実験では、参加者間の知識量の差や技術に対する不信感がパフォーマンスに影響を与える可能性を考慮し、実験全般の説明を行った後に実験を開始した。実験の流れは、最初に脳波機器を装着し、信号の安定度を確認した。次に、BCI 制御トレーニングを行い、取得した脳波データを解析した。その後、参加者がどの程度正確に魔法を発動できるかを検証するタスクを実施した。タスク終了後には、ゲーム体験に関するアンケートとインタビューを行い、参加者の主観的な評価を収集した。

トレーニングセッションでは、動画の指示に従い

ながらイメージ想起を繰り返すトレーニングを行った。トレーニング動画は、安静 3 秒、指示 1 秒、合図 1 秒、イメージ想起 5 秒のサイクルを繰り返す構成となっている (図 5)。イメージ想起では、炎魔法イメージ、休憩、雷魔法イメージ、休憩の順番で行い、このサイクルの繰り返しを 5 分間で 1 試行とし、試行間に休憩を設け 4 試行を行った。トレーニング終了後、取得した脳波データを解析することにより特徴量を抽出し、SVM に学習させた。これにより、参加者個人に最適化した分類器と、リアルタイム脳波データから特徴量を抽出するための CSP フィルターを作成した。この一連のプロセスにより、参加者の脳波パターンを効果的に学習し、魔法のイメージ想起を識別できるシステムを構築した。

タスクでは、参加者は BCI を用いてイメージ制御により魔法を発動し、敵を攻撃するゲームをプレイした。参加者には、ランダムに出現する 2 種類の敵に応じて、効果的な魔法のイメージを想起し続けるように指示した。1 試行につき 20 体の敵を倒し、合計 3 試行を行った。実験中は、敵の種類と参加者が発動した魔法の入力を計測し、参加者がどの程度正確に適切な魔法を発動できたかを記録した。これにより、オノマトペを用いた脳波制御訓練手法によるゲームプレイにおける参加者の制御パフォーマンスを定量的に評価した。

タスク終了後、プレイヤーのゲーム体験を評価するために、5 段階のリッカート尺度を用いた主観評価アンケートを実施した。このアンケートでは「操作性」「没入感」「体験の楽しさ」の 3 つの観点から 12 項目の質問を用意した。

4 結果

4.1 制御パフォーマンス

オノマトペを用いた脳波制御訓練手法の有効性を検証するために、魔法ビデオゲームを用いた実験を行った。実験では、出現した敵に対して最適な魔法を選択できた割合を算出し、その結果を制御パフォーマンス指標として用いた。この指標は、参加者が意図通りの魔法を発動できたかどうかを示すものであ

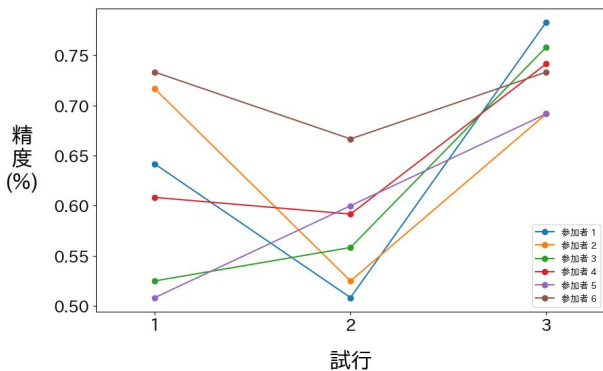


図 6. 各セットにおける制御パフォーマンスを示す折れ線グラフ。敵を倒す回数を重ねていくことで、精度が向上する傾向があった。

る。なお、実験参加者の一名が全く魔法を制御できなかったため外れ値とした。

実験の結果、参加者が意図通りの魔法を使った割合は60%以上であった(図6)。このことは、プレイヤーがある程度意図通りに魔法を制御できることを示唆した。また、敵を一体倒すためにかかった平均時間は11.366秒であった。さらに、敵を倒すプロセスの中で、最初の試行で精度が悪かった参加者も、敵を倒す回数を重ねていくことで、精度が向上する傾向があった。これは、BCI制御トレーニングにおいて、BCIシステムの操作習熟度がトレーニング時間に依存する可能性を示唆した。

4.2 ゲーム体験

オノマトペを用いた脳波制御訓練手法による魔法ゲーム体験について、5段階リッカート尺度を用いたアンケートによって評価を行った。評価は「操作性」「没入感」「体験の楽しさ」の3つの観点から実施した(表2)。

操作性に対する評価では、参加者がどの程度自分の意図通りに魔法を制御できたかを示し、評価には4項目の質問を用意した。直感性、自然な操作感の2項目については4を記録したが、操作性と満足感の2項目については3.14を記録した。また、参加者ごとに評価にばらつきが見られ、操作性には個人差があった。没入感に対する評価では、プレイヤーがどれだけゲームの世界に没入できたかを示し、評価には3項目の質問を用意した。3項目の平均値はすべて3.5以上を記録し、2項目において中央値が4を記録した。没入感に関して、個人差はあるものの、本手法を用いた操作によりゲームの没入感が向上する可能性がある。体験の楽しさに対する評価では、魔法ゲームの楽しさがどの程度だったかを示し、評価には5項目の質問を用意した。プレイ体験の斬新さに関する質問では、平均値4.71の高い値を記録した。これは、魔法ゲームが参加者にとって新しい

ゲーム体験を提供することを示唆した。また、魔法の制御の楽しさとエンターテインメント性に関する質問では、平均値4.2以上の値を記録し、プレイヤーにとって楽しいゲーム体験をもたらしたことを示唆した。ゲームの楽しさに関する全体的な評価は、平均値、中央値ともに高い結果となった。

オノマトペを用いた脳波制御訓練手法による魔法ゲーム体験は、操作性にばらつきがあるものの、楽しいゲーム体験を提供できる可能性を示した。

4.3 インタビュー

オノマトペを用いた脳波制御訓練手法による魔法ゲーム体験について体験評価を行うため、タスク終了後にインタビューを実施した。このインタビューの目的は、魔法ゲームに対するユーザーの主観的な感想や印象を調査することであった。

インタビューの結果、多くのユーザーが魔法ゲームに対して肯定的な印象を抱いていることが明らかになった。例えば、「トレーニング次第で上達するのが面白い」、「後半徐々に上手に操作できるようになった」や「トレーニング次第で上手くなる感覚があった」といった意見を得た。これらの意見は、魔法ゲームが参加者に新しいモチベーションを与えた可能性があることを示唆する。つまり、ゲームを上手にプレイするために、自身の「イメージの技術」を向上させるという目標がユーザーに生じているのである。

一方で、「イメージしている魔法が出ない時にストレスを感じた」、「アニメやゲームの世界で魔法がうまくできない人の気持ちがわかった」といった意見も得た。これらの意見は、魔法ゲームが、プレイヤーに新しいタイプのフラストレーション体験を与えていることを示唆する。つまり、本システムでは、ユーザーが自身の思い通りに魔法を使えないもどかしさも体験できる。この体験は、プレイヤーに新しいゲーム体験をもたらす可能性がある。

従来のゲームでは、魔法技術習得の過程で生じるフラストレーションを体験することはなかった。ゲーム内での魔法の成功や失敗は、主にゲームのルールやパラメータに依存しており、ユーザーの習熟度とは関係しない。これに対し、本システムでは、ユーザーのイメージ想起の巧拙が魔法の成功に直結するため、現実世界で魔法技術を習得するかのような体験を実現できる可能性がある。

5 議論

5.1 BCI操作とゲームの親和性

本研究では、オノマトペを用いた脳波制御訓練手法による魔法ゲーム体験が参加者に良い体験を提供したことを示唆する結果となった。タスク終了後に実施したアンケートおよびインタビューにおいて、

表 2. オノマトペを用いた脳波制御訓練法を用いた魔法ゲーム体験は、操作性、没入感、体験の楽しさを 5 段階のリッカート尺度によるアンケートで評価した。

観点	質問	中央値	平均値
操作性	オノマトペを用いた魔法の生成は、直感的で自然に感じた	4	4
	オノマトペによる魔法の制御は、操作性や応答性に優れていると感じた	3	3.14
	オノマトペを用いた魔法の生成に、違和感を感じなかった	4	4
	オノマトペを用いた魔法の制御に満足している	3	3.14
没入感	炎や雷などの魔法を使用している感覚を強く感じた	4	3.57
	ゲームプレイ中、魔法の世界に没入している感覚があった	3	3.57
	魔法を使用している実感が湧いた	4	3.57
体験の楽しさ	このゲームは、魔法を使うという新しい体験を提供していると感じた	5	4.71
	オノマトペによる魔法の制御は、楽しく、エンターテインメント性が高いと感じた	4	4.42
	オノマトペを用いた魔法の制御は、面白みがあると感じた	4	4.28
	このゲームシステムを友人に勧めたいと思う	4	4.28
	このゲームシステムをまた遊んでみたいと思う	5	4.71

参加者は没入感やゲームの楽しさに関して高く評価し、「オノマトペを唱えることで、魔法を使っている感覚を感じた」「イメージどおりの魔法が出た時は魔法を制御している感覚があった」といったポジティブなフィードバックを得た。

ただし、BCIを用いた全てのゲームが良い体験になるわけではない。市販ゲームを限定的なBCI操作でプレイした先行研究では、BCI制御の有無で楽しさや没入感に関して有意差はないことを示した [17]。これは、ゲームのアバターモードをリラックス状態とストレス状態により制御するという限定的な操作であり、自分で操作している感覚が少なかったため、BCI制御がゲーム体験に影響を与えなかった可能性がある。

魔法ゲームが没入感やゲームの楽しさに関して高い評価を示したのは、魔法を生成、操作する体験と、BCIを用いたイメージによる操作の間に高い親和性があり、心地の良いユーザ体験を提供できたからだと考察する。このことから、イメージによる制御体験と親和性の高いゲームを選択することは、プレイヤー体験を最大化させる可能性がある。

5.2 視覚フィードバックが与える影響

タスク終了後のインタビューにおいて、「一度魔法が発動すると魔法の切り替えが難しかった」という意見を得た。この問題について、同じ魔法が連続して入力される傾向があった。これは、視覚的なフィードバックを受けながら視覚イメージを想起するという本システムの特性上、意図した魔法とは別の魔法が検知された際、視覚的に誘因されている可能性が高い。この問題は、運動イメージにはない視覚イメージ特有の問題である。運動イメージでは、身体の動きをイメージするため、視覚フィードバックのネガティブな影響を受けにくい [10]。一方、視覚イメージでは、視覚的なイメージを心の中で構築しなければならないため、視覚フィードバックの影響を受け

やすい可能性がある。

視覚イメージは、「知覚からではなく、記憶から由来する知覚情報の操作」と定義され、視覚刺激を観察する視覚観察タスクと、視覚刺激を想起する視覚イメージタスクに分類できる [7, 20]。視覚観察タスクと比較して、視覚イメージタスクではBCIパフォーマンスが低い傾向があるため、本システムでは、視覚観察タスクによりトレーニングを行った。そのため、視覚的なフィードバックを顕著に受けた可能性がある。

この問題を解決するためには、視覚イメージタスクと視覚観察タスク時の脳波データから各々分類器を開発し、イメージタスクと観察タスクの特性を組み合わせたアンサンブル分離器を開発することが有効であるかもしれない。魔法の発動前と発動中で別の分類器による入力を受け取ることで、視覚フィードバックの影響を軽減できる可能性がある。今後の研究では、視覚イメージを用いたBCI制御における視覚フィードバックの影響を検証していく必要がある。

5.3 展望

今回のユーザスタディでは、参加者が意図通りの魔法を使えた割合は60%程度にとどまった。しかし、試行を繰り返すことにより精度が向上する傾向があったことから、長時間プレイすることによる精度向上が期待できる。今後は、トレーニング時間やタスク時間を伸ばすことにより、どの程度制御パフォーマンスが向上するか検証する。また、本研究では条件比較を行っていないため、本手法がBCI制御によるゲーム体験において、制御パフォーマンスとゲーム体験の向上に与える影響を直接的に確認することはできなかった。オノマトペによる発話イメージの有無によるBCI制御の比較や、他の脳波制御手法による魔法制御との比較を行うことで、本手法の効果を定量的に評価する必要がある。

参考文献

- [1] B. Blankertz, C. Sannelli, S. Halder, E. M. Hammer, A. Kübler, K.-R. Müller, G. Curio, and T. Dickhaus. Neurophysiological predictor of SMR-based BCI performance. *Neuroimage*, 51(4):1303–1309, 2010.
- [2] B. Blankertz, R. Tomioka, S. Lemm, M. Kawanabe, and K.-R. Müller. Optimizing spatial filters for robust EEG single-trial analysis. *IEEE Signal processing magazine*, 25(1):41–56, 2007.
- [3] M. A. Cervera, S. R. Soekadar, J. Ushiba, J. d. R. Millán, M. Liu, N. Birbaumer, and G. Garipelli. Brain-computer interfaces for post-stroke motor rehabilitation: a meta-analysis. *Annals of clinical and translational neurology*, 5(5):651–663, 2018.
- [4] U. Chaudhary, N. Birbaumer, and A. Ramos-Murguialday. Brain-computer interfaces for communication and rehabilitation. *Nature Reviews Neurology*, 12(9):513–525, 2016.
- [5] I. Guler and E. D. Ubeyli. Multiclass support vector machines for EEG-signals classification. *IEEE transactions on information technology in biomedicine*, 11(2):117–126, 2007.
- [6] L. Hinton, J. Nichols, and J. J. Ohala. *Sound symbolism*. Cambridge University Press, 2006.
- [7] N. Kosmyna, J. T. Lindgren, and A. Lécuyer. Attending to visual stimuli versus performing visual imagery as a control strategy for EEG-based brain-computer interfaces. *Scientific reports*, 8(1):13222, 2018.
- [8] S.-H. Lee, M. Lee, J.-H. Jeong, and S.-W. Lee. Towards an EEG-based intuitive BCI communication system using imagined speech and visual imagery. In *2019 IEEE international conference on systems, man and cybernetics (SMC)*, pp. 4409–4414. IEEE, 2019.
- [9] D. J. McFarland and J. R. Wolpaw. EEG-based brain-computer interfaces. *current opinion in Biomedical Engineering*, 4:194–200, 2017.
- [10] M. Mousavi, A. S. Koerner, Q. Zhang, E. Noh, and V. R. de Sa. Improving motor imagery BCI with user response to feedback. *Brain-Computer Interfaces*, 4(1-2):74–86, 2017.
- [11] C. S. Nam, A. Nijholt, and F. Lotte. *Brain-computer interfaces handbook: technological and theoretical advances*. CRC Press, 2018.
- [12] Y. Park and W. Chung. Optimal channel selection using correlation coefficient for CSP based EEG classification. *IEEE Access*, 8:111514–111521, 2020.
- [13] G. Pfurtscheller, G. R. Müller-Putz, R. Scherer, and C. Neuper. Rehabilitation with brain-computer interface systems. *Computer*, 41(10):58–65, 2008.
- [14] D. Plass-Oude Bos, B. Reuderink, B. van de Laar, H. Gürkök, C. Mühl, M. Poel, A. Nijholt, and D. Heylen. Brain-computer interfacing and games. *Brain-computer interfaces: applying our minds to human-computer interaction*, pp. 149–178, 2010.
- [15] S.-D. Rosca and M. Leba. Design of a brain-controlled video game based on a BCI system. In *MATEC Web of Conferences*, Vol. 290, p. 01019. EDP Sciences, 2019.
- [16] S. K. Swee, K. D. T. Kiang, and L. Z. You. EEG controlled wheelchair. In *MATEC web of conferences*, Vol. 51, p. 02011. EDP Sciences, 2016.
- [17] B. van de Laar, H. Gürkök, D. P.-O. Bos, M. Poel, and A. Nijholt. Experiencing BCI control in a popular computer game. *IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games*, 5(2):176–184, 2013.
- [18] A. Vourvopoulos, S. Bermudez i Badia, and F. Liarokapis. EEG correlates of video game experience and user profile in motor-imagery-based brain-computer interaction. *The Visual Computer*, 33:533–546, 2017.
- [19] M. P. Woźniak, P. Sikorski, M. Wróbel-Lachowska, N. Bartłomiejczyk, J. Dominiak, K. Grudzień, and A. Romanowski. Enhancing in-game immersion using BCI-controlled mechanics. In *Proceedings of the 27th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, pp. 1–6, 2021.
- [20] Z. Zhou, A. Gong, Q. Qian, L. Su, L. Zhao, and Y. Fu. A novel strategy for driving car brain-computer interfaces: Discrimination of EEG-based visual-motor imagery. *Translational neuroscience*, 12(1):482–493, 2021.
- [21] 小野正弘. 日本語オノマトペ辞典: 擬音語・擬態語 4500. (*No Title*), 2007.
- [22] 平野怜旺, 岸駿斗, 和栗真花, 山田紗妃, 渡邊恵太. BCIxD: ブレインコンピュータインタラクショナルデザイン. In *WISS 2023 Proceedings*, 2023.
- [23] 平野怜旺, 渡邊恵太. メンタルイメージベースのBCIにおけるオノマトペを用いた脳波制御訓練手法の提案. エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2023 論文集, pp. 220–227, 2023.