原著論文

脳波による脳トレ競技「bスポーツ」の可能性について

— ロボットアバターを用いた対戦競技の実施報告 —

長谷川 良平*, 竹原 繭子*,**, 山本 泰豊*

* 国立研究開発法人産業技術総合研究所, ** 筑波大学大学院

Feasibility of “bSports” as an EEG-based Cognitive Training

— A Report on Competitive Fighting using the Robot Avatar —

Ryohei P. HASEGAWA*, Mayuko S. TAKEHARA*,** and Hiroto S. YAMAMOTO*

* AIST, 1-1-1 Umezono, AIST Tsukuba Headquarters, Tsukuba, Ibaraki 305-8560, Japan

** Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8577, Japan

Abstract : Our goal is to promote brain health through “bSports” (brain-Sports), a form of social sport competition using brain-machine interfaces. As the core technology, we have been developing an electroencephalography-based cognitive training system, “Neurotrainer,” using event-related potential as a virtual “mind switch” to control games. Here, we aimed to assess the performance of the Neurotrainer under competitive conditions between players. Fifteen pairs of healthy adults, including older people with tendency of degrading motor functions, were involved in a one-hour session of 4 games. Each player activated the mind switch to select one of eight pictograms to control his/her robot avatar for its desired action. All players regardless of age performed well at the level of about 85% success rate and reported that they had fun with our body-free technologies. These results suggest that bSports is an effective cognitive training and social activity that can be appreciated by people across all generations.

Keywords : EEG, BMI, Event-related potential, Cognitive training, bSports

1. はじめに

1.1 認知症予防アクティビティの候補としてのブレイン-マシンインターフェースの可能性

超高齢社会になった本邦では、患者数が約600万人にも上る認知症問題が深刻化している。未だ決定的な治療法の開発の見通しが具体化していない現段階では、高齢者の脳の健康維持につながる予防的介入が重要である[1, 2]。そのような介入手法の一種として注目されているのが、認知トレーニングである[3-5]。国内では「脳トレ」とも呼ばれ、効果の程度に差はあるとしてもすでに多くの国民に受け入れられ、ゲームのジャンルとしても確立している。一方、運動機能が全般に低下した高齢者やゲーム操作に必要な動作が困難な運動機能障がい者においては、健常者同様に脳トレゲームをプレーすることができないという問題があった。

この問題の解決に貢献する可能性があると考えられるのが、脳と機械を直結する「ブレイン-マシン インターフェース」(Brain-Machine Interface: BMI) 技術である[6]。BMI技術には様々な種類があり、近年では言葉や動作を用いず脳活動で直接パソコン等外部機器の操作ができるようになりつつある。特に頭皮上で脳由来の電気活動を計測する脳波計測に基づく「脳波BMI」は、安全かつ簡便にBMI技術を実現できる点で有望であり[7]、脳波BMIを用いれば高齢者や障がい者でも認知トレーニングの機会を十分に持てると予想される。

また、WHOの認知症予防ガイドラインでは、認知トレーニングと並んで社会的アクティビティの重要性が指摘されている[3]。脳波BMIによる認知トレーニングをスポーツゲームのように複数人で行うことによって、競争心に基づくモチベーションアップや社会的アクティビティとしての効果があると考えられる。

そこで本研究では、認知機能と運動機能の両機能に低下リスクのある高齢者における認知症予防に貢献するシステム/サービスの候補として、脳波BMIによる脳トレ競技「bスポーツ」(bはbrainの頭文字)の実現可能性を、主として技術的側面から検討した。以下に、この目標の達成に向けた著者らのこれまでの取り組みを紹介する。

1.2 脳波BMIを応用した認知トレーニングシステムの開発に関するこれまでの取り組み

bスポーツの社会実装に向けた最初の取り組みとして、我々は脳波BMIによる認知機能訓練装置「ニューロトレーナー®」の試作開発を行った[8]。この装置の元となるのは、重度運動機能障がい者の生活支援に向けて実用化開発を行っている、脳波BMIによる意思伝達装置「ニューロコミュニケーター®」である[9, 10]。この装置は、注意の高まりを反映する頭皮上脳波成分「事象関連電位」(Event-Related Potential: ERP)[11, 12]を手掛かりとして、PC画面上に提示される絵カード(介護の要望等を示すピクトグラム)のうちからユーザーが希望するもの一つを選び、CGアバターのアニメーションを伴う人工音声によってわかりやすく表出するものである。

ニューロトレーナーでは、ニューロコミュニケーターで用いてきた簡便性の高い脳波計測用ヘッドギアや少数試行の加算でERPを検出するアルゴリズムを活用し、認知トレーニング用のアプリケーション（いわゆる「脳トレゲーム」）を新たに開発した。この際、参考にしたのが「オドボール課題」[13]である。オドボール課題は、ある特定の刺激が高頻度で提示されているときに、低頻度で別の刺激（オドボール＝oddball：英語で「変わり者」を意味）を提示する認知課題であり、オドボールの出現時に強いERPが発生することが知られている[12-14]。

ニューロトレーナーでは、そのような先行研究を参考にし、ユーザー（以降、「プレーヤー」と呼ぶ）が、オドボールに対してERPを強く発生できれば仮想スイッチ（これを「脳波スイッチ」と呼ぶ）を随意的に「オン」にすることでゲームに成功できるようにした。オドボール形式のゲームは「モグラたたき」のようなわかりやすいルールであるうえ、2択で偶然に正解する確率（チャンスレベル）が50%と高い。その状況に随意的な脳波スイッチの効果が加われば過半数の試行のゲームで成功することが可能である。実際、非高齢健康者対象の実験においては約83%という高確率でゲームに成功できることが示された[8]。

1.3 bスポーツの実現において今回着目する課題

これまでのニューロトレーナーの試作開発で一定の成果が得られた反面、今後多くのプレーヤーに自発的に継続利用してもらうことができるかについては懸念事項もあった。なぜなら、単純な2択ゲーム形式で最初から成功率も高ければ、早い段階で飽きが来ってしまうかもしれないからである。一方、ニューロトレーナーの開発の元となっているニューロコミュニケーターでは、1回あたり8種類のピクトグラムから1つを

選択できたり、ロボットアバターのジェスチャーとともに表出させたりすることも可能である[15]。

もし、脳波によってロボットにいろいろな動作できるというSF要素が加われば、ニューロトレーナーの継続的な利用につながる可能性がある。また、高齢者のみならず若者にも関心を持ってもらえることが予想されるため、世代を超えた対戦競技化も実現するかもしれない。そこで、ニューロトレーナーの高度化開発においてもこれらの技術シーズを活用することにした。

1.4 本研究の具体的目的

本研究を含むプロジェクト全体の最終目標は、脳の健康の維持・増進に貢献する社会的アクティビティとして、脳波による脳トレ競技「bスポーツ」の実現可能性を検討することである（図1）。本研究における具体的な目的は「短時間のイベント形式でロボットアバターを用いた対戦競技としてのbスポーツを多様なプレーヤーが実施できる」ことを実証することである。

なお、bスポーツにおける勝敗を左右する要因としては注意機能に着目した。高次脳機能に関する様々な臨床的研究から、注意機能は、あらゆる脳機能の基盤として重要であることが指摘されている[16]。脳波BMIは、そのような注意機能を反映した脳活動をプレーヤーに即時フィードバックすることができるため、効率的な認知トレーニングが可能と考えられる。ただ、その効果の検証には、長期間の反復訓練を伴う実験が必要であるため、今回は検討しなかった。また、bスポーツをビジネスとして考えたときに実用化の見通しに関して検討すべき点も数多く存在すると考えられるが、その検証も今後の課題とした。

以下に今回のbスポーツイベントの実施とその検証のための具体的方法を述べる。

図1 「健康脳」維持・増進のためのプロジェクト全体像と「bスポーツ」の位置づけ

脳波による脳トレ競技「bスポーツ」の可能性について

2. 方法

2.1 研究協力者

本研究では、実験当時、認知症や軽度認知障害など認知機能に関する病的低下の診断を受けていない22才から80才までの成人男女計30名の有償ボランティアを研究協力者とした。本研究ではこれらの協力者のことを「プレイヤー」と呼ぶ。

プレイヤーは、産業技術総合研究所内の常設専用実験室あるいは、つくば市役所内の会議室を用いた特設会場にて2名ずつbスポーツを体験した。プレイヤーの年齢層・性別構成は、60歳以上が13名（男性7名、女性6名）、60歳未満は17名（男性5名、女性12名）であった。なお、60歳未満群は平均38歳、60歳以上群は平均72歳であった。

すべてのプレイヤーに対して事前の実験説明と文書による同意取得を行った。またbスポーツ体験終了後にはアンケートへの回答にも協力してもらった。なお、本研究の実験計画書は、「ヘルシンキ宣言に基づく倫理的原則」および「人を対象とする医学系研究に関する倫理指針」（厚生労働省）に沿って作成され、所属組織の人間工学実験委員会において承認済みである（人2020-141）。

2.2 実験手続きの全体像とその特徴

同じ実験室内に、2名のプレイヤーを招き、実験の説明と同意取得を行った（約5分）。まず、各プレイヤーに脳波計測用のヘッドギア（後述）の装着を行い、閉眼によるアルファ波の出現などによって良好な脳波データが計測できる状態であるかどうかを確認し、必要に応じて調節を行った（約10分）。次に、各自のERPの波形パターンをシステムに登録するためのキャリブレーション（図2）を1セッションずつ、2人同時に実施した（休憩含め約10分）。

登録した波形パターンに基づき脳波スイッチを利用する準備が整ったところで、その2名による対戦競技形式でbスポーツを1セッション実施した（約20分）。実験終了後、ヘッドギアを外すと同時並行で、競技成績の発表や競技結果に関する考察などに関する説明を行った（5分以内）。最後に、bスポーツ体験に関するアンケートを実施した（10分以内）。全ての手続きを合わせて1時間以内と想定した。

本研究の革新的な側面は、ハンズフリーで認知課題を実施できる点にある。これを可能にするコア技術が、ERPの即時検出による脳波スイッチである。ERPは生体内外のノイズに対して極めて微小な電位であるだけでなく、心電位などとは異なり、波形パターンの個人差が大きな生体電位である[17, 18]。それゆえ、ERPによる脳波スイッチのリアルタイム利用に先立ち、個々のプレイヤーにおいてそのERPの波形パターンを登録するためのキャリブレーションを実施した。

2.3 キャリブレーションの概要とその実施手続き

キャリブレーション時、プレイヤーの眼前に置かれたPC画面（実験制御用PCにUSB接続されたサブモニター）にERPを誘発する視覚刺激を提示した。馴化による意欲低下を避けるため、キャリブレーション時の画面には本番のbスポーツで用いる視覚刺激のセットではなく、我々の研究室でこれまで用いてきた別の刺激セットを用いた。具体的には、脳波によるロボット制御用の基本セットとして感情状態をダイナミックに表現するためのジェスチャー8種類を示した絵カードを用いた（図2左上）。

上述したように、キャリブレーションの目的は、画面上に配置した絵カード8種類のうちの1つ（標的）に対してプレイヤーが注意を向けている際に発生するERPの波形データを多数収集することである。標的の設定は実験者（システム）側で行い、

図2 実験システムおよびキャリブレーションの概要

設定された絵カードの外枠を、3秒間、元の黒色から明るい緑色に変化させることでプレイヤーにどの絵カードが標的かを教示した。標的教示の1秒後、キャリブレーションを開始した。具体的にはプレイヤーが標的に注意を向け続けている間、標的および非標的の全8種類のいずれかの絵カード上に「これかな」という4文字のひらがなを次々に瞬間提示し続けた[19]。この提示頻度は8 Hz (約125ミリ秒間隔)であり、8種類の絵カード上に疑似ランダム順で1度ずつ瞬間提示を行った。これに要する時間は約1秒である(この単位を「1ブロック」と呼ぶ)。

1ブロックが終わった後も標的を変えないまま、連続10ブロック(計10秒)にわたって「これかな」の瞬間提示を継続した(この単位を「1ゲーム」と呼ぶ)。1ゲームが終了した時点で、10秒間の休憩をとった後、上述した方法で別の絵カードを標的として教示し、次のゲームを行った。8種類の絵カードを1度ずつ標的として計8ゲーム実施した(この単位を「1セッション」と呼ぶ)。

キャリブレーション時、ERPが発生するのは、標的に「これかな」の瞬間提示が行われたタイミングである。そのため、なるべくプレイヤーがその瞬間を見逃さず、標的に注意を向け続けておくように、プレイヤーへの事前のルール説明において、各ゲーム中、標的に「これかな」が出現した回数を頭のなかでカウントするように依頼した。もし、プレイヤーが正しくカウントできていれば、ブロック数と同じく最終的に10回となるはずであり、それを確かめるためにセッション終了後に毎ゲーム、10回ずつカウントできたかどうかを報告させた。

なお、標的に対する「これかな」の瞬間提示が行われる平均間隔は1秒であるが、ブロックの変わり目において連続もしくは隔回で標的に「これかな」の瞬間提示が行われるとカウントが困難になると考え、最低2回は別の絵カード上に瞬間提示がなされるように制御プログラムを設定した。結果的に最小間隔は375ミリ秒間となり、自己報告ではあるもの

の高齢者を含めたほとんどのプレイヤーにおいて正しい回数もしくはわずかの欠損でカウントがなされていた。

キャリブレーション終了後の5分間の休憩の間に、得られたデータに対してオフライン解析を行い、キャリブレーション中に脳波データの計測が正常に行われ、かつ非標的と比較して標的に対して大きな反応を示すという特徴のあるERPが検出できたかどうかを確認した。稀に装置の不具合やプレイヤーがゲームルールを誤解していたために有効なデータが取得できていない状況があったが、そのような場合には、キャリブレーションをやり直した。取得したデータが有効と判断された場合には、判別モデルを生成した。そのうえで、ロボット動作を伴う単発のゲームを1~2度実施し、次に述べるbスポーツのリハーサルとした(図2中央)。

2.4 bスポーツの概要とその実施手続き

bスポーツのセッションでは、2名のプレイヤーが交互に脳波スイッチによるロボットアバターの制御に挑戦した。サブモニター画面上に並べて提示される8種類の選択肢から1つ標的を選ぶという点ではキャリブレーションと同じである。ただし、bスポーツセッションでは、スポーツ競技などをモチーフにした8種類のロボット動作のイメージ写真を刺激セットとした(図3(A))。

2名のプレイヤーは各自の担当のオペレーターを介して横並びの位置関係にあり、各人1セットずつのシステム制御用PCや、それとつながるプレイヤー用のサブモニターが置かれたテーブルの前に座った(図3(B))。その前方のテーブルには、脳波制御対象となるヒト型ロボットやそれと関係した小物類を配置した。図示はされていないが、競技スペースは壁際にあり、その壁(白色)にPCに接続したプロジェクターからの画面を投影し、各プレイヤーによる脳波解読の様子や得られた実験データ(ERPの波形パターンや標的解読結果など)を両者が互いに確認できるように

図3 bスポーツの概要：(A) ロボット競技用画面、(B) 競技用ブース、(C) ロボット競技

脳波による脳トレ競技「bスポーツ」の可能性について

した。プレイヤーの配置をこのようにした理由は、各プレイヤーが自分だけでなく相手のプレイヤーが脳波によるロボット制御に成功したかどうかを観察できるようにするためである。

今回用いたロボット（近藤科学製「KHR ver. 2.0」）は関節自由度が22軸あることで多様な動作をすることができるバージョンである。なお、ロボット動作の登録には、関連ソフトの「HeartToHeart4」を用いた（キャリブレーション用に8動作、bスポーツ用に8動作を設定、そのうち1動作は重複）。今回のようなロボット競技を準備するにあたり、まず、我々は見ただけでも楽しいと思われるロボット動作を新規に4種類考案した（図3（C））。例えば、バスケットボールを両手でつかんで持ち上げて頭越しに前方のリングに向けてシュートを行って通過させるといったものである。この一連の動作を実現するため、あらかじめシュートが成功するように各種関節角度やリングの位置を設定した。その他にも、サッカーのシュート（ボールやゴールなどのツールも利用）や、空手の瓦割り（瓦の代わりに厚紙を利用）、そして恋愛漫画等における壁たたき動作（いわゆる「壁ドン」[20]）をロボット動作として登録した。

これら4種類の動作に加え、以前に福祉機器のシステムの一部として作った感情表現などの4動作をリストに加え、計8種の動作が選択可能ようにした。今回は時間的な制約から新規に作成した4種類の動作に限定し、1種類1ゲームずつ、全4ゲームを交互に実施した。各ゲームでどの選択肢が正解になるかは、毎ゲーム直前にロボットをセッティングした場面を見せながら教示した。

キャリブレーション時と同様、1ゲーム内での標的の選択方法は、標的に注意を向けている際に、8 Hzで瞬間提示される「これかな」が標的に現れた際に頭のなかでカウントすることである。最大ブロック数はキャリブレーション時と同様、10ブロックであるが、bスポーツ時にはリアルタイムで標的解読を行えるというメリットを活かし、一定の基準（後述）に達した場合には10ブロック未満でも「これかな」の瞬間提示を打ち切り、標的の予測を行った。

このような打ち切り手法の導入によって、ゲームの勝敗にスピード感が加わり、緊張感やスリルが増すと考えた。もちろん、

いずれの場合も標的の選択に成功するとは限らない。そのため、ゲームの勝敗の判断は以下の基準で行った。まず、一方のプレイヤーだけが脳波スイッチによる標的選択に成功すれば勝敗は明確である。次に、両者とも成功した場合にはより早いブロック（時間）で解読が終わったプレイヤーを勝者とした。もし両者が失敗した場合や、両者が成功しても解読に要したブロック数が同じだった場合には「引き分け」とした。

ゲームの先攻/後攻は、第1ゲームの場合はキャリブレーションの成績に応じて、第2ゲーム以降は直前のゲームの成績に応じて決定した。具体的には第1ゲームの際はキャリブレーションにおける最終ブロックの解読精度が高かった方が後攻（同率の場合は途中のブロックも参照）、第2ゲーム以降は、前ゲームの勝者が後攻となった。それらで判断できない場合は前ゲームと先攻/後攻の順番を入れ替えた。

対戦競技としての雰囲気を出すために、ゲームの勝敗は実験室内のホワイトボードの表に毎ゲーム後、書き込んだ。また、全4ゲーム終了時には勝者を称え、敗者をねぎらった。

2.5 実験システムとオフラインデータの解析

ニューロコミュニケーター用の小型無線脳波計搭載の樹脂製ヘッドギアをニューロトレーナーでも使用した（図2右下および図4）[8]。ゲーム画面の制御や刺激提示にタイムロックした脳波データの解析には、市販のWindows OSのPC（インテル® Core™ i7クラスのCPU搭載）を用いた。さらにプレイヤーへの直接的な刺激提示には当該PCに接続したサブモニターを用いた（ASUS製15.6インチ画面の液晶モニターをプレイヤーの眼前約60 cmの位置に設置）。

脳波データは、一般に強いERPが観察できる頭頂部付近の5か所、具体的には国際10-10法の記載[21]に基づき、FC1、FC2、Cz、CP1、およびCP2に設置した信号電極で計測した（図4（A））。なおデータ取得やフィルタリングなどの詳細は著者らによる先行論文[8]の記載と同様である。ERPは個人差が大きいことが知られているが[17, 18]、個々人で標的と非標的で異なるパターンの波形が観察される限り、それが根拠となって標的の予測が可能と考えた。以下にその具体的方法を述べる。

図4 ヘッドギアの電極配置 (A) 及び、あるプレイヤーの事象関連電位の観察例 (B)

2.6 脳波スイッチの準備と運用

もし、キャリブレーション時の全データを用いた加算平均によって標的/非標的に対する差別的反応が観察されたとしても、ゲーム単位かつそれを8種類の選択肢ごとに分割した場合には、グラフの見た目からどの絵カードが標的かを判断することは困難である。一般的な脳波計測実験とは異なり、現場で解析を行い、かつ続くセッションでリアルタイムに適切なフィードバックを行うためには、解析を自動化する必要がある。そこで我々は、5個の電極の各15か所の計測時点(刺激提示直後の約700ミリ秒の区間を均等に15分割)における電位データの特徴量(計75個)に対して恣意的な区間設定やチャンネル選択などを行わず、全特徴量を区別なく用いて線形判別モデルの生成および判別得点の算出を行うことで脳波スイッチを実現した。

具体的には、標的と非標的のデータを2クラスとする一般的な線形判別分析を実施後、標的に対して平均+1、非標的に対して平均-1の判別得点を算出する判別モデルを作成した(2クラスのサンプル数のバイアスを補正するスケールリングも含む)。この解析手続きの多くは、2択の解説を行った我々の先行研究[8]と共通である。ただし8択の解説を行った本研究においては、各絵カードが提示されたときに取得した脳波データに対して判別モデルを適応し、得られた8個の判別得点を比較した[9]。その結果、最大の判別得点を示した絵カード、つまり脳波スイッチが押された対象が標的と同じであったかどうかによって標的解説の成否を決めた。

セッション終了後のオフライン解析が可能なキャリブレーション時には、1ゲームあたり最大10ブロック分のデータがあるため、最終の10ブロック目においては各絵カード10セットずつの特徴量データがある。このデータによって生成される判別モデルの性能、つまり脳波スイッチによる標的解説精度は交差検証法を用いて調べた。具体的には「あるゲームの予測を行う際、残り7ゲームで判別モデルを生成する」という作業を8ゲーム分繰り返して標的の解説精度を計算した。

例えば、第1ゲームの予測を行うためには第2～第8ゲームのデータを用いて判別モデルを生成する。その後、各ブロックにおける各絵カード8種の刺激提示1回ずつと対応した特徴量から判別得点を算出した。そして、絵カードごとに第10ブロックまでの判別得点を累積し、上述した比較によって当該ゲームの解説成否を判断した。全ゲームでこの作業が終了時に8ゲーム中、解説に成功したゲームの割合を標的解説精度とした。

この計算において、10ブロック分の判別得点を累積する途中のブロックにおいても標的解説精度を求め、モデルの性能評価の参考にした。

2.7 bスポーツ時における脳波スイッチ検出の高速化

リアルタイムで脳波解説を行うbスポーツでは、最大10ブロック(時間にして10秒)の判別得点の累積の余地を残しつつ、極力、少ないブロック数(短い時間)で脳波スイッチを発動させることができるような解析手法を導入した。具体的には各選択肢に対する判別得点を累積する過程において、累積判別得点が事前に設定した閾値を超えた際には、それが

標的であるか否かにかかわらず、そのブロックで「これかな」の瞬間提示移動を打ち切ってゲームの成否を判断した[22]。

この手法の導入によって、全10ブロックを用いたときに比べてゲームの成功率が落ちるリスクもあるが、両者が成功した場合でも、打ち切りブロック数比較によって勝敗を引き分けて終わるゲームを減らすことが可能となる。また強い反応が早い解説につながるという意識から、プレーヤーがより集中することで強いERPが出るようになる想定された。もし、最終ブロックを待たずに打ち切れることを実感できれば、次のゲームではより、高いモチベーションで取り組むようになると期待した。

2.8 bスポーツの実用化に向けた検証ポイント

本研究では、このようなbスポーツの実用化の可能性を検討するうえで重要な視点として、まず、①「コンパクトで簡便性の高い装置や手順を利用しているメリットがあるか」に関して1ペア2名の体験に要するまでに短時間で終了可能かを検証した。具体的には、実験室への入室後の実験参加への同意取得に始まり、キャリブレーションとbスポーツ体験に加えてアンケートの記載も完了して退室するまでの時間を1時間以内に終了できるかどうかを運営上の成功の指標とした。

また、②「脳波解説によるハンズフリーのロボット操作が成功したか」に関してプレーヤー平均としては80%以上のゲーム成功率を達成できるかどうかを検証した。なるべく高い標的解説精度を維持すべき意思伝達支援用の福祉機器とは異なり、エンターテインメント性が重視されるゲームとして考えた時には、全員が失敗しないほどゲーム成功率が高すぎると勝敗がつかなくなる。そこで、ある程度の失敗があるようにキャリブレーション時の各ゲームのブロック数は、福祉機器利用時の15ブロックではなく10ブロックに、脳波計測に用いる電極数は8個ではなく5個に減らすことにした。これらの変更は簡便性向上や短時間実施にも貢献するが、その結果としてゲーム成功率が目標の平均80%を下回ることがないかどうかは実際に試してみる必要があった。また、bスポーツを体験したことに対するプレーヤーの印象に関しては、図7に示すような計30項目に関するアンケートを実施し、5段階評定によって回答させた。

最後に③「実験結果に個人差があるとしてもそれが年代や性別によって大きく影響を受けることなく誰にでも勝利のチャンスがあるか」を検証するために2つの年代×性別でグループ化して解析し、グループ間に差があるかどうかを調べた。

3. 結果

3.1 キャリブレーション時のデータの全般的特徴

キャリブレーション時のデータの解析に関して、まず、ERP研究における一般的な解析例を図4(B)に示す。この例は、1名のプレーヤーのキャリブレーション時の1セッション分すべてのデータに関して電極別かつ標的/非標的別に加算平均した波形プロットである(黄色背景で示した刺激提示100ミリ秒間のデータで基線補正した、緑色背景部分のデータを

脳波による脳トレ競技「bスポーツ」の可能性について

図5 キャリブレーション時の事象関連電位の生波形 (A) 及び標的解読精度 (B)

解析)。図から頭頂部5か所のそれぞれの電極位置において、非標的と比較して標的に対して強いERPの反応が観察された。電極の違いによる反応に多少の違いもあったが、概ね類似の反応が見られた。

波形の個人差はあるものの、30名すべてのプレイヤーにおいて標的/非標的に関する時系列電位データの波形パターンが異なっていた。その結果、全プレイヤーのデータを平均した場合でも、標的と非標的に対する差別的な応答を観察することができた(図5(A))。この平均波形では、標的に対しては「これかな」の瞬間提示後、150～200ミリ秒にかけて陽性方向に約4マイクロボルトのピークとなる瞬間的な電位変化が観察された。その後、波形は減衰し、陰性方向への反応も観察された。一方、非標的に対しては、平均波形として目立った電位変化は観察されなかった。

同じくキャリブレーション時のデータに関して、脳波スイッチによる課題遂行の可能性を調べるために、交差検証法を用いたシミュレーションを実施した。その解析結果を見ると、第1ブロックからチャンスレベル(8択の場合は12.5%)をはるかに上回る解読精度(約43%)が観察され、その後、ブロック数の増加とともに解読精度は上昇し、最終10ブロックでは約94%に達していた(図5(B): 誤差線は標準誤差を示す)。

3.2 bスポーツの実施結果

今回は時間的な制約から各プレイヤーには4種のbスポーツを1ゲームずつしか試してもらったが、その4ゲーム中の何ゲームで成功したかを「ゲーム成功率」として各人の実験結果とした。その結果、30名の平均のゲーム成功率は85%となり、数値目標の「平均80%」を達成することができた。

ゲーム成功時の打ち切りブロック数の平均は4.5ブロックであり(4.5秒に相当)、本手法を用いれば打ち切らない場合の10ブロック(10秒)を大幅に短縮してゲームをスムーズに進行できることが明らかとなった。

ゲーム種目に関しても違いがあり、それぞれの成績は瓦割が97%、バスケットボールが87%、サッカーが83%、壁ドンが73%の順であった。打ち切りブロック数に関しては少ない順に壁ドンが4.0ブロック、サッカーと瓦割が4.1ブロック、バスケットボールが5.5ブロックとなっていた(成功した場合の平均)。

3.3 脳波解読における年代および性別の影響

年代および性別が及ぼす脳波解読精度への影響を調べるために、キャリブレーションでの最終10ブロックでの標的解読精度(図6(A))およびbスポーツでのゲーム成功率(図6(B))

図6 プレイヤー属性ごとのキャリブレーション及びbスポーツの成績

を年代と男女の性別ごとに集計しなおし、グラフ化するとともに統計検討を実施した（誤差線は標準誤差を示す）。各結果について対応の無い二要因の分散分析を実施したところ、年代や性別に関する主効果もそれらの交互作用に関しても統計的な有意差（ $P<0.05$ ）は見られなかった。つまり、実験結果に個人差はあったとしても、それが特定の年代や性別に属しているからとは言えないことを示している。

なお、グラフ化はしていないが、bスポーツでの成功時の打ち切りブロック数に関しても同様の検定を行ったが、やはり有意差は確認されなかった。

3.4 bスポーツ体験に関するアンケート結果

全実験セッションが終了したプレーヤーに対して、bスポーツを体験した印象に関して全30項目のアンケートを実施したところ、図7のような結果を得た。本研究の狙いである、拡張版ニューロトレーナーの成功体験（Q.1-1）や、楽しめたかどうかの印象（Q.2-1）、ロボット利用の意義（Q.2-2）に関して高評価を得た。また、その競技化によるbスポーツについても、対戦形式でのモチベーションアップ（Q.2-4）や、世代間交流の機会（Q.2-6）などに関して高評価を得た。一方、公の場でのプレー（Q.2-3）や有料サービスとしての利用（Q.2-10）などに関しては、平均値としては肯定的であっても他の回答に比べて得点が低かった。

4. 考 察

4.1 本研究のサマリー

本研究では、ニューロトレーナーとヒト型ロボットを活用した対戦形式の短時間イベントとして、bスポーツを様々な属性の人々に体験してもらった。その結果、高齢者を含む参加者は、年齢層や性別に特に大きな差はなく、脳波スイッチによって高い成績でゲームを実施することができた。所要時間も全員1時間以内であった。また、多くのプレーヤーがゲーム後のアンケートに対し、高速・高精度の脳波解読によってハンズフリーのロボット操作を体験し、驚きと喜びを感じたと報告した。

これらの結果から、少なくとも上記の条件においては、bスポーツの実用化に向けての技術的重要課題である、短時間の対戦競技イベントの実施可能性が示された。今後、bスポーツが認知機能の維持・向上効果を持つことを科学的な側面から実証しつつ、多世代交流のアクティビティとしても実社会で貢献する可能性を検証していきたいと考えている。

4.2 高齢者がbスポーツを行う意義

本論文の冒頭で述べたように、超高齢化の進む本邦で特に深刻な問題となっている認知症に関し、心身機能の維持や社会参加を促進するアクティビティが推奨されているが[3]、身体機能の低下した高齢者では怪我のリスクも高いために運動量や参加者を制限することも多い。

図7 bスポーツを体験した印象に関するアンケートの結果

脳波による脳トレ競技「bスポーツ」の可能性について

これに対し本研究では、注意の瞬間的な高まりを反映する頭皮上脳波成分であるERP [11, 12]をゲーム制御の脳波スイッチとして利用する技術[8]を提案した。パターン識別技術によってERPを即時検出し、比較的リアルタイム性の高い外部機器制御が可能であることはこれまでも示されている [7, 23]。本研究ではそれらの先行研究を発展させ、取得したデータの信頼性に基づいて刺激提示の繰り返し回数を必要最小限に限定する独自手法 [22]を導入することで、円滑なゲーム制御に結び付けた。

近年、ERPは、認知症に伴う認知機能低下のバイオマーカーの候補としても臨床応用が検討されている [24, 25]。楽しみながら自らの脳の健康を実感できるbスポーツを介して、普段の生活では決して計測することのないERPに関わるきっかけとなり、また、そのゲーム成績の低下をきっかけに認知機能の低下に早期に気づくこともあるかもしれない。

4.3 bスポーツにおける選択肢増加の意義

上述したように、本研究に先立つ取り組みとして我々はオドボール課題を参考にした紙芝居形式で提示される絵カードに対するERPの反応強度に基づいて2択でゲーム操作を行うシステムを開発した [8]。一方、本研究では場所配置型で提示される8種類の選択肢から一つを高速で選ぶシステムとなっている [9]。これによって商品や移動方向の選択のような日常生活に近い状況を再現したゲームコンテンツを導入することが可能となった。もちろん8択というのは我々の既存のシステムと互換性の良い数であるというだけであり、4択でも6択でも10択でも可能である。

ゲーム成績の評価に関しては、必ずしも毎回の選択結果がゲームの成功/失敗に直結するのではなく、たとえ意図した選択結果ではなかったとしても、分岐が多いアドベンチャーゲームではその選択結果に合わせてストーリーを楽しむことが可能である。そのようなゲームでは、8択方式によってチャンスレベルが低下するデメリットが緩和される。あるいは逆に予期せぬ展開もあるという意味でメリットにさえるといえる。

4.4 bスポーツにおけるロボットの利用意義

これまでも多くの先行研究で脳波によるロボット制御システムの開発が検討されてきた。その目的の代表例が運動機能障がい者の「生活の質」向上を目指した、道具使用行動の代行などである [26, 27]。それらの研究ではERP等の脳波信号によってヒト型二足歩行ロボットに何かをつかませたり、それを持って移動させたりできることが示されてきた。

我々の研究チームにおいて、道具使用行動に加えてその有用性を検討しているのが、ロボットが行うジェスチャーである。古くからヒトの行うジェスチャーの重要性が論じられており、心理学実験によっても対人コミュニケーション場面における他者の心理状態の理解においてジェスチャー等の非言語情報に依存する割合が高いことが報告されている [28]。

我々も、脳波解読実験で用いるロボットアバターに多数のジェスチャーを登録し、その脳波による制御実験を実施して

きた [13]。ロボットによるジェスチャー表出には他に小道具や事前の設定などが不要なため、脳波でロボットを動かすデモを簡便に実施する際、便利である。本研究のキャリブレーション時にも、本番のゲームコンテンツを伏せておくためにジェスチャー用の画面を用いたり、生成した判別モデルを確認したりするためのロボット制御にジェスチャー表出を利用した。

ロボットに道具使用を代行させることもジェスチャーを表出させることも、将来、ニューロコミュニケーションのような福祉機器の制御対象として、運動機能障がい者の「生活の質」向上に向けた研究開発のプラットフォームとしても貢献すると考えられる。

4.5 bスポーツにおける対戦競技化の意義

本研究では、bスポーツを介した多世代間交流の促進に関しても検討を行った [29, 30]。たとえニューロトレーナーが個人的に楽しく、かつ将来的な検証によって認知機能を高める効果があったとしても、一部のゲームのように「引きこもり」を助長するものであれば、プレイヤーの社会性や活気のある街づくりにとってプラスにはならない。それゆえ、ニューロトレーナーが世代間を含めて他者との交流を促進するためには、その目的に向けた特別な配慮が必要なはずである。上述した高齢者向けの「アクティビティ」においても心身機能の維持だけでなく、社会参加の促進効果が期待されている。ただし、そこで想定されている交流対象は高齢者のみである。

一方、若年者においては、パソコンやインターネットの普及から、eスポーツ (esports: エレクトロニック・スポーツの略。広義には電子機器を用いて行う娯楽、競技、スポーツ全般) が世界的に普及してきている [31]。eスポーツでは身体への負担や怪我のリスクが少ないために、今後、高齢者にも普及する可能性がある。しかし、eスポーツにおいてもその操作は主に手指や上肢に依存するために動きの俊敏さや巧緻性も必要であり、たとえ高齢者がeスポーツに参加するとしても、若年者との対戦や交流は限定的にならざるを得ない。

高齢者によるeスポーツの参加が難しい反面、若年者によるbスポーツの積極的参加の可能性は十分あると考えられる。技術的な革新性から「脳波テレパシー」とも評されるBMI技術は、好奇心旺盛な多くの若者や、ストレス解消やマインドトレーニングに関心のある幅広い世代の人々の高い関心を惹くと予想している。

さらにbスポーツは、一般にゲーム操作に用いる上肢等の運動機能が低下した障がい者も楽しむことができる。また、比較的ルールも単純であるため、軽度認知障害の患者や、長期の寝たきりによる生活不活発病の一種として認知機能低下の兆候やリスクのある方々でも参加できる可能性がある。このように、bスポーツによって促進される多世代交流は、健常者に限定されず、一部の障がい者や患者も含めたうえで、ともに脳の健康の維持・増進を目指すことが可能である。

4.6 bスポーツの今後の展開

本邦では近年、内閣府によって提唱された未来社会像「Society 5.0」の構築が目指されている [32]。Society 5.0は、サイバー空間（仮想空間）とフィジカル空間（現実空間）を高度に融合させたシステムにより、経済発展と社会的課題の解決を両立する、人間中心の社会のことである。bスポーツはまさに仮想空間とフィジカル世界をニューロテクノロジーによって直結しようとするものであり、そのプロセスにはイノベーションが必須であり、その結果には社会課題の解決が待っている。

この社会課題の説明の助けとなるのが、2015年に国連サミットでの提唱された「持続可能な開発目標（Sustainable Development Goals: SDGs）」である [33]。bスポーツはSDGsでリストされている主要17目標のうちの3つの目標「(3) すべての人に健康と福祉を」、「(11) 住み続けられるまちづくりを」、そして「(9) 産業と技術革新の基盤をつくろう」の解決に同時に貢献できると考えられる。このようなbスポーツの実用化に向け、賛同・参加して下さる人々とともに少しずつでも前進していきたいと我々は考えている。

謝 辞

本研究の一部は、NEDO (15102349-0)、科研費 (18H03142)、TIA「かけはし事業」(TK19-024/TK20-064)、つくば市「令和元年度つくば Society 5.0 社会実装トライアル支援事業」[29, 30]、そして文部科学省「地域イノベーション・エコシステム形成プログラム」/「つくばイノベーション・エコシステムの構築（医療・先進技術シーズを用いた超スマート社会の創成事業）」の支援を受けた。本論文に関して、開示すべき利益相反関連事項はない。

参 考 文 献

- [1] Middleton, L.E., and Yaffe, K.: Promising strategies for the prevention of dementia. *Archives of Neurology*, 66(10), pp.1210-1215, 2009.
- [2] Plassman, B.L., Williams, J.W.Jr., Burke, J.R., Holsinger, T., and Benjamin, S.: Systematic review: factors associated with risk for and possible prevention of cognitive decline in later life. *Annals of Internal Medicine*, 153(3), pp.182-193, 2010.
- [3] Risk Reduction of Cognitive Decline and Dementia: WHO Guidelines. World Health Organization, Geneva, 2019.
- [4] Irazoki, E., Contreras-Somoza, L.M., Toribio-Guzmán, J.M., Jenaro-Río, C., van der Roest, H., and Franco-Martín, M.A.: Technologies for cognitive training and cognitive rehabilitation for people with mild cognitive impairment and dementia. A systematic review. *Frontiers in Psychol*, 11, Article 648 (pp.1-12), 2020.
- [5] Yates, L.A., Ziser, S., Spector, A., and Orrell, M.: Cognitive leisure activities and future risk of cognitive impairment and dementia: systematic review and meta-analysis. *International Psychogeriatrics*, 28(11), pp.1791-1806, 2016.
- [6] 長谷川良平:ブレイン-マシンインタフェースの現状と将来, 電子情報通信学会誌, 91(12), pp.1066-1075, 2008.
- [7] Wolpaw, J. R., Birbaumer, N., McFarland, D. J., Pfurtscheller, G., and Vaughan, T. M.: Brain-computer interfaces for communication and control. *Clinical Neurophysiology*, 113(6), pp.767-791, 2002.
- [8] 長谷川良平, 中村美子, 跡部悠未, 竹原蘭子: 事象関連電位による認知機能訓練システムの開発 - 高齢者の認知症予防向けアクティビティへの応用を目指して -, 日本感性工学会論文誌, 20(1), pp.49-57, 2021.
- [9] 長谷川良平: 脳波BMI技術を用いた実用的意思伝達システム, 電子情報通信学会誌, 95(9), pp.834-839, 2012.
- [10] 中山優季, 松田千春, 小倉朗子, 望月葉子, 中村美子, 長谷川良平: 重度運動障がい者における脳波計測による意思伝達装置「ニューロコミュニケーター」を用いた意思伝達の有用性と看護支援に関する研究, 日本難病看護学会誌, 17(3), pp.187-204, 2013.
- [11] Sutton, S., Braren, M., Zubin, J., and John, E.R.: Evoked potential correlates of stimulus uncertainty, *Science*, 150(3700), pp.1187-1188, 1965.
- [12] 入戸野宏: 心理学のための事象関連電位ガイドブック, 北王子書房, 2005.
- [13] Squires, N.K., Squires, K.C., and Hillyard, S.A.: Two varieties of long-latency positive waves evoked by unpredictable auditory stimuli in man. *Electroencephalography & Clinical Neurophysiology*, 38(4), pp.387-401, 1975.
- [14] 長谷川良平, 中村美子: 標的選択課題遂行中の事象関連電位の特性 - 認知機能評価システムの開発を目指して -, 日本感性工学会論文誌, 19(1), pp.89-96, 2020.
- [15] Hasegawa, R.P., and Nakamura, Y.: An EEG-based communication aid that uses the robot avatar. *Proceedings of the 8th International Workshop on Biosignal Interpretation (BSI2016)*, pp.76-77, 2016.
- [16] 立神粧子, Ben-Yishay, Y. (監), 大橋正洋 (監): 前頭葉機能不全 その先の戦略 - Rusk 通院プログラムと神経心理ビラミッド. 医学書院, 東京, 2010.
- [17] Nittono, H., Nageishi, Y., Nakajima, Y., and Ullsperger, P.: Event-related potential correlates of individual differences in working memory capacity. *Psychophysiology*, 36(6), pp.745-754, 1999.
- [18] Hasegawa, R.P., Hasegawa, Y.T., Nakamura, Y.: Development of neuroauthenticator: feasibility of an EEG-based authentication. *2017 International Conference on Biometrics and Kansei Engineering (ICBAKE)*, ID37, pp.127-131, 2017.
- [19] 南哲人, 井上康之, 長谷川良平: ニューロコミュニケーターにおける性能向上の試み - 感性を考慮したブレインマシンインタフェースの開発 -, 日本感性工学会論文誌, 11(4), pp.509-518, 2012.

脳波による脳トレ競技「bスポーツ」の可能性について

- [20] 朝日新聞出版:「知恵蔵2014」(現在の「コトバンク」
<https://kotobank.jp/word/壁ドン-189837>).
- [21] American Electroencephalographic Society: Guideline thirteen: Guidelines for standard electrode position nomenclature. *Journal of Clinical Neurophysiology*, 11(1), pp.111-113, 1994.
- [22] Hasegawa, R. P., and Nakamura, N.: An attempt of speed-up of Neurocommunicator, an EEG-based communication aid. *Lecture Notes in Computer Science*, 9447, pp.256-263, 2016.
- [23] Farwell, L. A., and Donchin, E.: Talking off the top of your head: toward a mental prosthesis utilizing event-related brain potentials, *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 70(6), pp.510-523, 1988.
- [24] Horvath, A., Szucs, A., Csukly, G., Sakovics, A., Stefanics, G., and Kamondi, A.: EEG and ERP biomarkers of Alzheimer's disease: a critical review. *Frontiers in Bioscience (Landmark Ed)*, 23(1), pp.183-220, 2018.
- [25] Rossini, P. M., Di Iorio, R., Vecchio, F., et al.: Early diagnosis of Alzheimer's disease: the role of biomarkers including advanced EEG signal analysis. Report from the IFCN-sponsored panel of experts. *Clinical Neurophysiology*, 131(6), pp.1287-1310, 2020.
- [26] Bell, C. J., Shenoy, P., Chalodhorn, R., and Rao, R. P.: Control of a humanoid robot by a noninvasive brain-computer interface in humans. *Journal of Neural Engineering*, 5(2), pp.214-220, 2008.
- [27] Chamola, V., Vineet, A., Nayyar, A., and Hossain, E.: Brain-computer interface-based humanoid control: A review. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 20(13), 3620, 2020.
- [28] Mehrabian, A.: *Silent messages: Implicit Communication of emotions and attitudes* (2nd ed.). Wadsworth, Belmont, CA, 1981.
- [29] つくば市政政策イノベーション部科学技術振興課: (つくば市の取組に関するWEB発表) 令和元年度 つくば Society 5.0 社会実装トライアル支援事業 (更新日2019.09.05). <https://www.city.tsukuba.lg.jp/shisei/torikumi/kagaku/1005023/1007437.html> (2019.09.05閲覧).
- [30] つくば市政政策イノベーション部科学技術振興課: (令和2年2月記者会への情報提供資料)「Tsukuba Mini Maker Faire 2020」で体験! 脳波で戦う「bスポーツ」と二人乗り自動運転ロボット「モビリス」-つくばSociety5.0社会実装トライアル支援事業(2020.02.12). https://www.city.tsukuba.lg.jp/_res/projects/default_project/_page/_001/009/765/2019NO273.pdf (2020.02.12閲覧).
- [31] 一般社団法人日本eスポーツ連合 Japan esports Union (JeSU) オフィシャルサイト: eスポーツとは, https://jesu.or.jp/contents/about_esports/ (2019.07.08閲覧).
- [32] 内閣府Webページ: Society 5.0 とは, https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/ (2019.07.08閲覧).
- [33] 外務省Webページ: SDGs とは, <https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/oda/sdgs/about/index.html> (2019.07.08閲覧).

長谷川 良平 (正会員)

1997年 京都大学大学院理学研究科博士課程卒(京大霊長類研究所にて神経生理学を専攻、理学博士)。米国国立衛生研究所などの研究員を経て、2004年に産業技術総合研究所に入所。現在、同・人間情報インタラクション研究部門上級主任研究員。2010年、重度運動機能障がい者のコミュニケーション支援を目的とした脳波による意思伝達装置「ニューロコミュニケーター」の試作開発に成功。SATテクノロジー・ショーケース2013 ベスト産業実用化賞受賞。2011年からは福井大学(連携大学院)工学研究科・客員教授を、2019年からは名古屋大学予防早期医療創成センター・客員教授を、2021年からは東京理科大学パラレル脳センシング技術研究部門・客員教授を兼務。一般社団法人日本ニューロテクノロジー推進センター理事長兼センター長に就任(2020年7月〜)。連絡先 〒305-8560茨城県つくば市梅園1-1-1 情報棟。長谷川: r-hasegawa@aist.go.jp

竹原 満子 (非会員)

2017年 筑波大学生命環境学群地球学類卒業。2019年 同大学大学院生命環境科学研究科地球科学専攻修士課程修了。修士(理学)。2019年 民間企業(地理情報システム関連)に入社。2020年 筑波大学大学院理工情報生命学術院生命地球科学研究群地球科学学位プログラム博士後期課程に復学し、現在に至る。産業技術総合研究所人間情報研究部門(2018年8月〜2019年3月)及び人間情報インタラクション研究部門(2020年5月〜)にてRAに従事。SATテクノロジー・ショーケース2019および2021にて学生奨励賞受賞(大学生・大学院生の部)。第49回(2020年度)リバネス研究費フォーカスシステムズ賞受賞。一般社団法人日本ニューロテクノロジー推進センター理事に就任(2020年8月〜)。

山本 泰豊 (非会員)

2020年 茗溪学園中学校高等学校(国際バカロレアディプロマ・プログラムコース)卒業。日英両語バイリンガル・ディプロマを取得。コロナ禍の影響で米国の大学への進学を延期し、同年産業技術総合研究所人間情報インタラクション研究部門技術研修員に就任。現在に至る。一般社団法人日本ニューロテクノロジー推進センター理事に就任(2020年8月〜)。2021年9月より米国スタンフォード大学人間生物学部に進学予定。