

身体動作を利用したインタラクティブゲームを用いた バランス機能の推定手法の提案

小田征史朗^{1,a)} Mao Haomin^{1,b)} 大西鮎美^{1,c)} 土田修平^{2,d)} 寺田 努^{1,e)} 塚本昌彦^{1,f)}

概要：バランス機能とは、静止姿勢または動的動作中の任意の姿勢を保つ、および不安定な姿勢から速やかに回復させる能力である。バランス機能は、障害などの先天性な理由や、疾患や老衰、加齢による運動機能の低下などの後天的な理由から機能低下が引き起こされる。バランス機能の低下による転倒などを防止するために、人間のバランス機能をスコア化し、定量的評価を行うバランス機能評価テストが存在する。しかしバランス機能評価テストは、測定に時間がかかる、専門スタッフの協力が必要であるといった煩雑さがある。そのため、日常生活における測定には、専門スタッフの協力を求めずに単一の測定項目や短時間の評価が望ましい。そこで、人間のバランス機能を簡単に測定する方法としてインタラクティブゲームを用いた機械学習によるバランス機能の推定手法を提案する。本研究ではインタラクティブゲームとして、テトリスに人間のモーションによるブロック生成の要素を取り入れた「ヒトリス」を、推定するバランス機能の指標として、BBSと自作の評価テストを用いる。ヒトリスはプレイヤーの身体動作を認識することで画面中に落とさせるブロックを生成し、プレイヤーとプレイヤーまたはプレイヤーとコンピュータ間の対抗や協力により、進行していくゲームである。評価実験では、バランス機能の推定のために作成した機械学習モデルの評価を行った。評価実験の結果、実際のヒトリスにて推定するバランス機能として、自作評価テストのスコアを設定することが適当である可能性が示唆された。

1. はじめに

バランス機能とは、静止姿勢または動的動作中の姿勢を任意の状態を保つ、また不安定な姿勢から速やかに回復させるといった身体や重心をコントロールする能力である。バランス機能は先天性障害、疾患や老衰、加齢による心身機能の低下などにより機能低下が引き起こされる。バランス機能低下は、日常基本動作・スポーツ能力の低下や後遺症が残る転倒リスクに繋がるため、日常的に自分のバランス機能を測定し、機能低下を防止することが重要である。現在、バランス機能をスコア化し、定量的評価を行うことで機能の維持・向上を働きかけるバランス機能評価テストが複数存在する。存在するバランス機能評価テストには、BBS(Berg Balance Scale)やTUG(Time UP-and-Go)、

FRT(Functional Reach Test)などがあるが、これら機能評価テストには、バランス機能に関する身体動作の測定項目が多くスコア測定に時間がかかる、専門のスタッフが必要であるといった煩雑さがあり、日常的なバランス機能評価には向いていない。そのため、日常生活におけるバランス機能の評価には、スコア測定時間が短く、自らで測定可能であることが望ましい。

Clarkら [1]は、インタラクティブゲームを用いた人間のバランス動作を考慮した際の姿勢評価が妥当であるとしている。そのため、ゲームプレイ時にバランス動作に関連のある姿勢やポーズを取るようなインタラクティブゲームがあれば、ゲームプレイ時にプレイヤーのバランス機能に関連がある身体動作情報が取得でき、その取得情報からプレイヤーのバランス機能を推定できるのではないかと考えられる。一方、筆者らの研究グループでは、インタラクティブゲームの一つとしてテトリスに人間のモーションによるブロック生成の要素を取り入れた「ヒトリス」がある [2]。ヒトリスはプレイヤーの身体動作を認識することで画面中に落とさせるブロックを生成し、プレイヤーとプレイヤーまたはプレイヤーとコンピュータ間の対抗や協力により、運動モチベーションを保つためのゲームである。ヒトリスはブロックを生成する際に、自然とポーズを取る動作に促されるこ

¹ 神戸大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Kobe University

² お茶の水女子大学 文理融合 AI・データサイエンスセンター
Ochanomizu University, Center for Interdisciplinary AI and Data Science

a) seishiro-oda@stu.kobe-u.ac.jp

b) maohaomin@phoenix.kobe-u.ac.jp

c) ohnishi@eedept.kobe-u.ac.jp

d) tsuchida.shuhei@ocha.ac.jp

e) tsutomu@eedept.kobe-u.ac.jp

f) tuka@kobe-u.ac.jp

とから、プレイヤーが取るポーズをバランス動作に関連あるものに誘導できれば、ポーズ動作時に身体のバランス機能に関する情報を自然に簡単に収集できると考えられる。現状のヒトリスは、プレイヤー同士が楽しく遊ぶというゲーム設計であり、ポーズを誘導する設計はされていないため、ゲーム設計を変更して作成しなおす必要がある。

そこで本研究では、ヒトリスを遊ぶ際のブロックを生成する過程からバランス機能に関する身体情報を収集し、その身体情報をもとにプレイヤーのバランス機能のスコアを推定する手法を提案する。本稿では、バランス機能の評価としてBBSと自作の評価テストを採用し、これらのスコアを提案システムを用いて推定する。自作評価テストはいくつかのバランス機能評価テストから代表的な項目を選出して作成した。それに対して、BBSは身体機能に障害を持つ人間へ医療・介護現場など用いられる評価テストである。両バランス機能評価テストは実際にバランス機能を評価できるが、自作評価テストの方が一般的な人間に対してははっきりとバランス機能の差を判明できると考えた。そこで本研究では、2種類のバランス機能評価テストのスコアを機械学習の正解データとして用い、機械学習によるスコア推定結果から提案手法に適した評価テストを判断する。またその後、機械学習によってバランス機能測定・表示機能を実現したヒトリスを作成する。

本稿では以降、2章で関連研究を紹介し、3章では提案システムの実装について述べる。4章では評価実験とその実験結果について説明し、5章では議論と今後の展望について述べ、6章では本稿をまとめる。

2. 関連研究

本章では、身体情報を用いた人間のバランス機能の評価や推定の可能性について議論する。また、身体情報を利用したインタラクティブゲームとバランス機能の関連性や身体情報を取得する方法を紹介する。また、本研究で扱うインタラクティブゲームであるヒトリスについて、先行研究の紹介を行う。

2.1 身体情報によるバランス機能の推定

Ghislieriら[7]はウェアラブルセンサを用いて取得した身体情報と立位バランスの関係性を調べた。具体的には、人体の6ヶ所に慣性センサを装着し、直立姿勢を行った際の身体情報を収集している。結果として、得られた身体情報は装着者の立位バランス機能の評価に有用であることがわかった。以上より、身体情報を用いることで人間のバランス機能を推定できると考えられる。

2.2 身体動作を利用したインタラクティブゲーム

本研究では身体動作を利用したインタラクティブゲームに注目した。身体動作を利用したインタラクティブゲーム

の例としてWii FitやKinectアドベンチャー!等がある。これらはゲームの進行にあたって様々な身体動作をプレイヤーが行う。そのため、身体動作を利用したインタラクティブゲーム中にプレイヤーに対してバランス動作に関する動きを誘導できれば、2.1節に記したバランス機能を推定可能であるような身体情報を取得できる。また、身体動作を利用したインタラクティブゲームとバランス機能の関係に着目した研究はいくつか存在する。Brownら[3]によれば、脳卒中を患った高齢者が任天堂Wii Fitを用いたゲーム形式のバランス訓練を5週間行ったところ、日常生活におけるバランス機能の改善が見られたと述べている。Hallら[4]はインタラクティブビデオゲームとバランス機能の関連性を調査した。20分以上の自立起立が可能な認知・視覚・神経障害を持たない60歳以上の女性16人を被験者として、身体能力検査と体を使った動的なインタラクティブゲームのプレイを実施した。調査結果より、身体能力検査の項目の一つにバランス機能評価テストの一種であるTUGが含まれていたことから、動的なインタラクティブゲームにおけるプレイヤーのパフォーマンスは、プレイヤーのバランス機能を評価する上で有用であることがわかった。Clarkら[5]は骨格情報を取得できるセンサデバイスやソフトウェアを用いた身体機能評価の妥当性を調査した。これらの性能を持つ例としてMicrosoft KinectやAsus Xtion, OpenPoseなど紹介しており、評価する身体機能として歩行機能や姿勢制御やバランス機能、運動機能を挙げている。結果として、上記のセンサデバイスやソフトウェアによって得られる骨格情報深度カメラやスケルトントラッキングは身体機能評価ツールとして有効であるとしている。

以上より、身体動作を利用したインタラクティブゲームは人間のバランス機能の維持や改善につながる。また、ゲーム中にプレイヤーに様々な身体動作を誘導しやすく、その際の身体情報をデバイス等で取得できれば、プレイヤーのバランス機能の評価を行う上でも有用な可能性がある。さらにゲーム形式である点から、モチベーション維持や長期のバランス機能改善にもつながるため、既存のバランス機能評価テストに比べて多くの利点が存在する。

2.3 身体情報の取得方法

デバイスやシステムを用いて、人間の身体情報を取得する方法はいくつかある。代表的なデバイスとしてモーションキャプチャが挙げられる。モーションキャプチャには光学式・慣性式・ビデオ式・磁気式などがあり、人間へのキャプチャ方法の違いによって分けられる。このどれもが人間へのスケルトントラッキングを実現し、対象者の3次元の骨格情報を取得することができる。しかし、モーションキャプチャの多くが対象者に器具を取り付ける必要があることやデバイスが高価であることから、利用現場が限られている。その中でデバイス例の一つであるMicrosoft

Kinect は、一つのカメラデバイスに RGB カメラ・深度カメラが内蔵され、対象者に器具を取り付けることなくスケルトントラッキングを行うことができる。また、このスケルトントラッキングの精度なども実用レベルの性能を持ちながらも、他のデバイスに比べて安価であるという利点も存在する。身体情報を取得可能なシステムの例として OpenPose がある。OpenPose は市販のカメラを通じて骨格情報を取得できるライブラリであり、特殊な器具等を必要としない。カメラがあれば画像や動画から解析可能なツールであるが、取得できる骨格情報が 2 次元であるといった欠点が存在する。

次に、2.1 節で紹介したようなインタラクティブゲームで使用されている身体情報取得方法を紹介する。Wii Fit で用いられる Wii Fit ボードには 4 つのストレインゲージ式フォースセンサが内蔵されている。この 4 つのストレインゲージ式フォースセンサがボード上の人間の体重移動を検知し、ゲームの操作を行う。Xbox360 の Kinect アドベンチャー! では Microsoft Kinect を用いて身体情報を取得している。Microsoft Kinect によって取得したプレイヤーの骨格情報をゲーム内のキャラクタの動きに反映させて遊ぶゲームとなっている。そのため、3D カメラやスケルトントラッキングを内蔵するデバイスやシステムをインタラクティブゲームに組み込み、プレイ時の骨格情報を取得できれば、プレイヤーのバランス機能を評価できると考えられる。そこで本研究では、深度カメラやスケルトントラッキングを用いたインタラクティブゲームによって人間のバランス機能を推定することを目指す。

2.4 既存のインタラクティブゲーム：ヒトリス

大西ら [6] は、テトリスに人間のモーションの要素を取り入れたインタラクティブゲームとして「ヒトリス」を作成している。ヒトリスはプレイヤーの身体動作を Xbox360 Kinect センサで認識することで画面中に落とさせるブロックを生成し、プレイヤーとプレイヤーまたはプレイヤーとコンピュータ間の対抗や協力により進行するゲームであり、プレイヤーの体と頭を同時に使うためデュアルタスクの効果が見込める。81 人の老若男女にヒトリスを体験してもらったところ、ヒトリスは運動モチベーションを保ったまま、健康を促進させる可能性があることが確認されている。しかし、この研究で作成されたヒトリスはプレイヤー同士が対決するゲーム設計であり、相手を邪魔をする目的で様々なポーズをとり、その形のブロックを相手フィールドに落下させゲームが進行していく。このゲーム方式ではプレイヤーのポーズをバランス動作に関連あるようなものに誘導することは難しい。そのため本研究では、バランス機能の測定を可能とするようなポーズをプレイヤーがゲーム中に取れるように誘導するゲーム設計を行う。

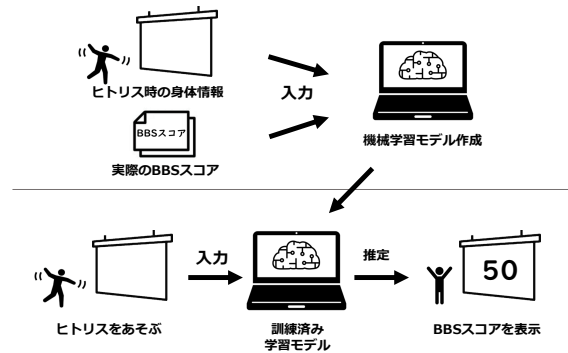


図 1: 提案システムの流れ

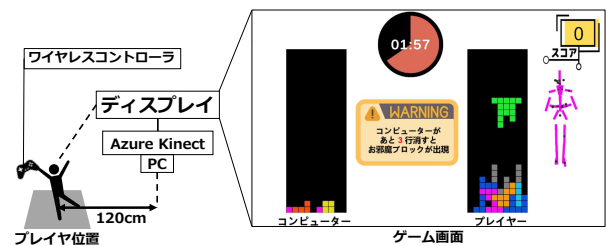


図 2: ゲーム環境

3. 提案システム

3.1 システム構成

提案システムの流れを図 1 に示す。ヒトリスをプレイすることでプレイヤーのバランス機能を推定する。バランス機能の推定には、ヒトリスプレイ時の身体情報と機械学習を用いて行う。機械学習によって推定したのち、プレイヤーに対して自身のスコアの表示を行う。ここでヒトリスのゲーム環境を図 2 に示す。提案システムは MSI 社の msi クリエイターノート PC Prestige-15-A11UC-1417JP, Microsoft 社の Azure Kinect DK センサ, Xbox360 ワイヤレスコントローラから構成される。ヒトリスのゲーム開発には Unity を採用し、機械学習は Python を用いて行った。また、接続したコントローラのボタンを PC におけるキーボード入力やマウス操作に自由に割り当てることのできるアプリケーションとして JoyToKey を使用した。

3.2 ヒトリスのルール設計

本研究でのヒトリスのゲーム体系は、プレイヤーとコンピュータの対決方式とした。2.3 節で説明したように、以前のヒトリスはプレイヤー同士の対決方式であり、相手を邪魔をする目的で様々なポーズをとり、その形のブロックを相手フィールドに落下させていた。しかし、このゲーム方式ではプレイヤーのポーズをバランス機能に関するものに誘導することは難しい。そこで自分のフィールドにポーズによるブロックが落下する設計にすることで、ブロックを作

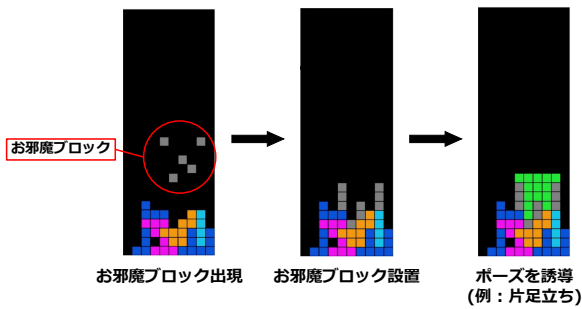


図 3: お邪魔ブロックの出現と設置

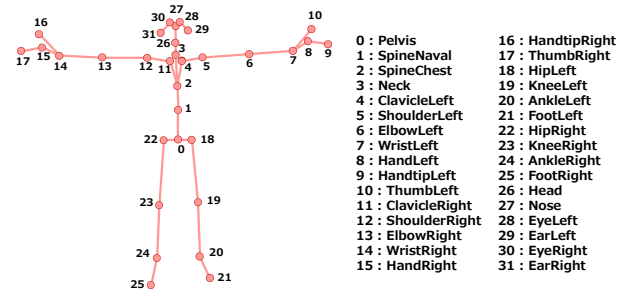


図 5: 取得可能な 32 箇所の部位

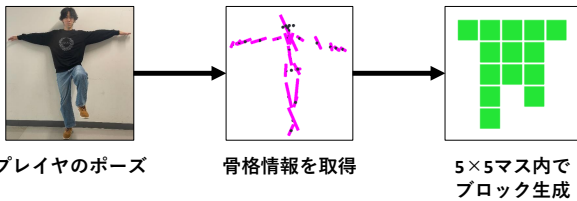


図 4: ブロックの生成手順

成する際にプレイヤーは最適なポーズを考えることとなる。そのため、その時のフィールド状況によって取るポーズを誘導できると考えた。またプレイヤーが一人でもゲームプレイ可能なようにコンピュータとの対決方式とした。プレイヤーとコンピュータはお互いのフィールドでゲームオーバーにならないようにプレイする。ゲーム中の通常状態では、プレイヤー・コンピュータともにテトリスと同様のランダムで出現する 7 種類のブロックを用いてゲームを進行する。しかし、コンピュータがブロックを複数回消すと、プレイヤー自身のポーズによって作られるブロックを用いる状況へと移行する。プレイヤーがブロック作成のためのポーズをとる直前に、ポーズをバランス動作に関連のあるようなものを誘導するために、図 3 のように「お邪魔ブロック」をプレイヤーのフィールドに出現させる。この「お邪魔ブロック」は他のブロックと違いプレイヤーはコントロールできず、落下するのみである。落下ののち、プレイヤーのポーズを誘導できるような形で設置され、プレイヤーがポーズを取るタイミングとなる。例として、図 3 ように片足立ちのポーズを作成することができれば、ブロックはきれいに設置され、問題なく以降のゲームを進めることができる。また、作成されたポーズによるブロックは他ブロックと同様のコントロールをすることができる。このブロックが固定されると、プレイヤーのフィールドに出現するブロックは再度ランダムな既存のブロックから選択されるようになる。以降、プレイヤーかコンピュータがゲームオーバーになるまで同様のゲーム進行が行われる。

3.3 ブロックの生成方法

プレイヤーのポーズからブロックが作られる手順を図 4 に示す。ヒトリスにおいてポーズによるブロック生成は、プ

レイヤのポーズを Azure Kinect で認識し、その際の身体座標を取得、その身体座標をもとに 5×5 の座標系に投影、身体座標と重なる適当な場所に 1 マスのブロックを配置するといった順序で行われる。またバランス動作に関連するポーズは、片足立ち・両足立ちのように足の位置が重要となる。そのためには、作成されるブロックも両足の位置が反映されることが重要である。そこで投影する際に、両足の座標を足が広がるように補正し、足の位置が明確にブロックに反映されるようにした。

3.4 機械学習によるバランス機能の推定に用いた学習データ

バランス機能の推定のためにポーズをとっている際の骨格情報を取得する。推定に用いる骨格情報は Azure Kinect の深度カメラで 3 次元時系列データとして取得する。取得する骨格情報は、図 5 に示す Azure Kinect で認識可能な 32 箇所の部位である。

推定の際に用いる特徴量は、各部位各成分の標準偏差を用いる。その後、実際のバランス機能評価テストのスコアを正解データとして、算出した特徴量と合して機械学習を用いることでバランス機能スコアを推定する。特徴量算出や機械学習はプレイヤーのポーズごとに行われるため、例としてプレイヤーが 1 回のヒトリスプレイにて 3 回ポーズタイムを行うと、3 回バランス機能スコアが推定されることとなる。そのため、ゲーム終了後にプレイヤーにバランス機能の推定値として表示される値は、各ポーズで推定されたバランス機能のスコアの平均値とした。また、機械学習モデル作成のための訓練データに偏りが無くなるように、訓練データにオーバーサンプリングを施した後に機械学習を行う。

4. 実験

4.1 実験概要

2 章で説明したヒトリスプレイ時の骨格情報から機械学習を用いてプレイヤーのバランス機能を推定可能かを確認する実験を行った。本実験では 2 種類のバランス機能評価テストを用いた。一つは BBS(Berg Balance Scale) である。BBS は高齢者や脳卒中患者の複合的なバランス機能を客

表 1: 学習モデルの評価結果

バランス機能評価テスト	相関係数	p 値	MAE	RMSE
BBS(56 点満点)	0.39	0.19	1.25	1.49
自作評価テスト (20 点満点)	0.66	0.01	3.40	4.93

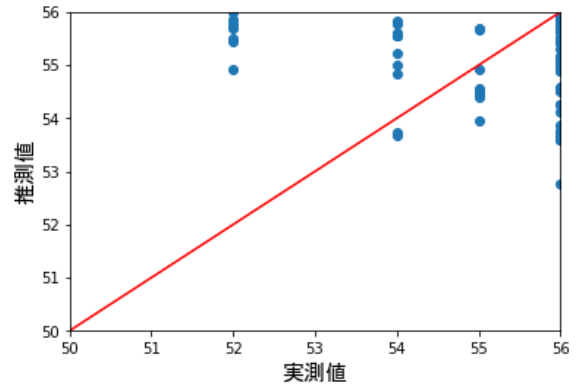
観的に評価でき、信頼性が高いとされている。BBS は測定項目が全 14 個あり、各 0~4 点の 56 点満点で測定される。二つ目は、バランス機能評価の簡便法として新体力テストでも採用されている、開眼片足立ちと閉眼片足立ちを用いた自作の評価テストとした。このバランス機能評価テストの項目は以下の 5 つとした。

- 1: 軸足が右足の開眼片足立ち
- 2: 軸足が左足の開眼片足立ち
- 3: 軸足が右足の閉眼片足立ち
- 4: 軸足が左足の閉眼片足立ち
- 5: 両手を胴体に対して 90 度曲げ、できる限り前方に伸ばす

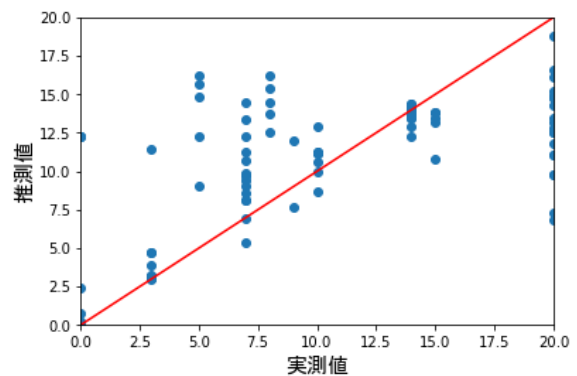
5 項目は BBS の測定項目の第 8 項目と同じであり、この項目によって体の前後方向のバランス機能も測定できると考え、採用した。1~4 項目は維持時間、5 項目は伸ばした距離に応じて、各 0~4 点の 20 点満点で測定する。また二つの評価テストを扱う理由として、前者の評価テストを試験的に体験したところ、健康な人間にとってバランス機能評価テストは簡単であり、有意な結果が得られない可能性があるかと判断し、後者の評価テストを扱うこととした。尚、すべての被験者が特定の慢性疾患を抱えておらず健康であったため、バランス機能評価テストの測定において専門スタッフの協力は求めている。被験者にはまず上記 2 種類のバランス機能評価テストを受けてもらい、その後ヒトリスを遊んでもらう。その際に、2 種類のバランス機能評価テストのスコアとヒトリスを遊んでいる際の骨格情報を取得する。取得した骨格情報から特徴量を算出した後、正解データを各被験者の実際のバランス機能評価テストのスコアとし、ポーズごとの特徴量と正解データを 1 セットとして、評価テストごとに機械学習を行う。また、誘導するプレイヤーのポーズとして、前述した 2 種類のバランス機能評価テストに含まれるような、軸足が右足の片足立ちと軸足が左足の片足立ちを設定し、それに伴うお邪魔ブロックを導入した。被験者は男女 17 名 (10 代未満 5 名, 10 代 1 名, 30 代 1 名, 50 代 2 名, 60 代 5 名, 70 代 3 名)、回帰器には SVR を用い、三分割交差検証を実施した。

4.2 実験結果

機械学習を行った実験結果として、2 種類のバランス機能評価テストの実測値と推測値のプロット図を図 6 に、各バランス機能評価テストで作成した学習モデルに対する 4 つの評価指数を表 1 に示す。



(a) BBS の推定結果



(b) 自作評価テストの推定結果

図 6: バランス機能評価テストの推定結果

4.2.1 BBS の推定結果

機械学習を実施した結果、BBS スコアの推定については、データに偏りがあったことから、オーバーサンプリングを施さなかった。表 1 から学習モデルにおいて、弱い相関が見られた。ただ、p 値が 0.19 であること、BBS における測定スコア範囲が 52~56 であることに對して MAE と RMSE が大きいことから、データに偏りがあることが分かる。健康な人間を被験者とした結果、BBS は有意な結果が得られなかった。また、BBS スコア 45 点以下の測定者が屋内外の生活で監視必要レベルであることを踏まえると、身体機能に障害を持つ人間がヒトリスによって自身のバランス機能を推定すると考えた場合、BBS スコアをバランス機能の推定値と設定することは不適当な可能性がある。

4.2.2 自作評価テストの推定結果

表 1 から、自作評価テストのスコアを推定する学習モデルは、強い相関が見られた。また p 値が小さいことから、実測値も大きいことが分かる。また MAE と RMSE においても、実測値の測定スコア範囲を考えると小さく値が得られており、精度が高い結果であることが分かる。

表 6b より、実測値 5~10 の範囲と 20 のデータ群にて、実測値と推測値に大きな乖離が生まれている箇所が存在す

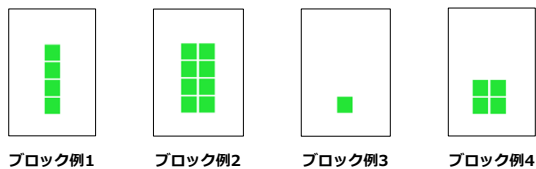


図 7: 被験者が作成を目指したブロック例

ることがわかる。これはオーバーサンプリングを施したためであると考えられる。今後はオーバーサンプリングを施さずとも偏りが少ないデータ得るために、被験者を増やす必要がある。

以上より、一般的に健康な人間がヒトリスによって自身のバランス機能を推定すると考えた場合、自作の場評価テストをバランス機能の推定値と設定することは適切であると考えられる。

4.2.3 プレイヤのポーズの誘導について

被験者 17 名のゲーム状況を観察した結果、ポーズを完全に誘導することはできなかった。誘導したいポーズ(本実験では片足立ち)を被験者が取らなかった理由として、大きく二つ挙げられる。一例目として、お邪魔ブロックが設置された場所とは違う場所にはまるようなブロックのためのポーズを取っていた。二例目として、どこにでもはまるようなブロックのためのポーズを取っていた。どこにでもはまるようなブロックとして、図 7 のような縦一列もしくは二列のみのブロックや、 1×1 や 2×2 のブロックがあった。

5. 考察

実験結果から、ヒトリスによってバランス機能を推定する際に用いる機能評価テストとして、身体機能に障害を持つ人間に対しては BBS スコアが、一般的に健康な人間に対しては自作の評価テストが適していることが分かった。BBS を含めた既存のバランス機能評価テストの多くは、主に高齢者や身体に障害を持つ人に向けて作成されており、本稿で実施した実験の被験者は健康的な人間であったため、精度が低い結果が得られたと考えられる。それに比べて、自作評価テストは被験者間で、スコア範囲の偏りが少ないことから、精度が高い結果が得られた。また、プレイヤーのポーズを完全に誘導できなかった理由として、ゲームを進める上でお邪魔ブロックによるプレイヤーへの妨害が足りなかった可能性がある。考えていたほどプレイヤーへの妨害ができていなかったため、プレイヤーは他の場所にはまるようなブロックの作成に意識を向けたと考えられる。またお邪魔ブロックの形や出現方法を変化させ、プレイヤーのポーズ誘導成功の割合を上昇できれば、プレイヤーはバランス動作に関連のあるポーズを多く取ることができ、機械学習の精度が向上すると考えられる。

そのため、今後は被験者の数を増やすことに加え、機械

学習に用いる特徴量の選定を行う。また、プレイヤーのポーズを誘導できるようなお邪魔ブロックの吟味や、他の誘導方法を検討する。

6. おわりに

本研究ではヒトリスを用いた人間のバランス機能の推定手法を提案した。また、推定するバランス機能の指標として、BBS と自作の評価テストを登用した。その後、ヒトリスの作成を行い、推定に用いる機械学習モデルの作成実験を行った。実験の結果、実際のヒトリスにて推定するバランス機能として、自作評価テストのスコアを設定することが適当である可能性が示唆された。今後は、多様な年齢層の被験者を増やすことに加え、特徴量の選定や新たな特徴量を検討することで推定精度の向上を目指す。さらに、作成された機械学習モデルとそのプログラムを現在のヒトリスに組み込み、遊ぶことでプレイヤーのバランス機能を推定しプレイヤーに対して表示を行うヒトリスの作成を目指す。

参考文献

- [1] R. A. Clark, Y. H. Pua, K. Fortin, C. Ritchie, K. E. Webster, L. Denehy, and A. L. Bryant: Validity of the Microsoft Kinect for Assessment of Postural Control, *Journal of Gait & Posture*, Vol. 36, pp. 372–377 (July 2012).
- [2] 仙波 拓, 寺田 努, 塚本昌彦: ヒトリス: 全身のポーズでブロックをパーツ化するインタラクティブゲーム設計, エンタテインメントコンピューティングシンポジウム論文集, pp. 34–39 (Nov. 2016).
- [3] R. Brown, H. Sugarman, and A. Burstin: Use of the Nintendo Wii Fit for the Treatment of Balance Problems in an Elderly Patient with Stroke: A Case Report, *International Journal of Rehabilitation Research*, Vol. 32, pp. 109–110 (Aug. 2009).
- [4] C. D. Hall, C. K. Clevenger, R. A. Wolf and J. S. Lin: Feasibility of a Low-Cost, Interactive Gaming System to Assess Balance in Older Women, *Journal of Aging and Physical Activity*, Vol. 24, pp. 111–118 (July 2016).
- [5] R. A. Clark, B. F. Mentiplay, E. Hough and Y. H. Pua: Three-Dimensional Cameras and Skeleton Pose Tracking for Physical Function Assessment: A Review of Uses, Validity, Current Developments and Kinect Alternatives, *Journal of Gait & Posture*, Vol. 68, pp. 193–200 (Feb. 2019).
- [6] 大西鮎美, 柳生 遥, 仙波 拓, 寺田 努, 塚本昌彦: ヒトリス: 健康促進を目的として体と頭を複合的に使わせるインタラクティブゲーム, 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム論文集, pp. 1863–1870 (July 2019).
- [7] M. Ghislieri, L. Gastaldi, S. Pastorelli, S. Tadano and V. Agostini: Wearable Inertial Sensors to Assess Standing Balance: A Systematic Review, *Journal of Sensors*, p. 4057 (Sep. 2019).