

磁気センサを用いたバランスボールトレーニングの 評価手法に関する提案と実装

片桐 凜太郎^{a)} 中村 優吾^{b)} 荒川 豊^{c)}

概要：

近年の社会背景から家で行うトレーニングが増えており、デバイスを用いた評価・介入手法が数多く提案されているが、センサを体につけたり、カメラなどのデバイスを設置するため、手軽には行いきにくい。我々は、家でのトレーニングとして非常に効果的であるバランスボールトレーニングを簡易的に計測する手法として、磁気センシングに着目し、バランスボールの空気入れ部分に挿し込むピン型磁石とスマートフォンアプリによってバランスボールトレーニングの内容や姿勢の良し悪しを計測する手法を提案する。被験者5名に対し、6種類のトレーニングを計測し、機械学習による識別を行ったところ、トレーニング内容の識別においては、K-Foldを用いた交差検証で94.7%、LOPO (Leave-One-Person-Out)を用いた交差検証で60.1%となり、姿勢の識別においては、K-Foldを用いた交差検証で90.7%、LOPOを用いた交差検証で59.7%であった。同時に計測した加速度センサデータによる結果と比較し、本研究の提案手法が優れていることを明らかにした。各個人のトレーニング中の姿勢の状態に差があったことや、悪い姿勢の定義が定量的に出来ていなかったことから、姿勢の識別の精度が良くなかったため、システム改善等を通して、より精度よく計測し、長期的なトレーニングを行うシステムを目指す。

1. はじめに

近年、日常的に行うトレーニングの中でも、家で行うトレーニングが注目されている。COVID-19の拡大やリモートワークの増加、高齢化社会の影響により、home-based exerciseを行う機会が増加傾向にあり、Bagherianらの研究[1]ではCOVID-19以前と渦中において、家でのトレーニングに関するキーワードの検索が増えたことが確認された。

しかしその一方で、家でのトレーニングは一人で行うことが多く、インストラクターなどの指導者がいない。トレーニングを行う場合、PC等の画面を見ながら動きを確認することが多く、姿勢が崩れ正しいトレーニングを阻害することがある[2]。Chenら[3]はこれらの課題を解決するために、体の傾き具合からPCが置かれた机の高さを自動的に調整する手法を提案しているが、その用途は限定的である。よってデバイス等によるトレーニングセンシングが必要になっている。

家でのトレーニングには多様な種類が存在するが、その中でも、バランスボールトレーニングは非常に効果的なト

レーニングであり、バランス能力を向上させることによって、体幹の安定性[4]や筋力増強[5]に効果的であることが報告されている。しかし、バランスボールトレーニングによってバランス能力が向上したことを報告した研究[6][7]は、バランス能力に関する別のテストのスコアによって評価しており、トレーニングの計測を行った研究は存在しない。バランスボールトレーニングの計測が可能になることで、トレーニングのフィードバックだけでなく、トレーニングを継続的に続けたことによる、バランス能力の向上を別のテストを介さずとも記録することが出来る。

これまでのトレーニングセンシングに関する研究を基に、頻繁に使用されるセンサやデバイスを以下にまとめた。

- IMU(加速度センサ+角速度センサ)[8]
- 圧力センサ[9][10]
- カメラ(画像解析)[2][11]

しかし、これらの手法は多様な動きがあるバランスボールトレーニングには不向きである。IMUや圧力センサの場合、ウェアラブルデバイスとして使用することが多く、デバイスの大きさによる不快感が生まれる、また、バランスボールトレーニングの場合、手や足の動きが同じであっても、体の乗せる場所によってトレーニング内容が異なってしまうため、手首や足首に装着したとしてもトレーニング内容を識別することは難しい。バランスボールにIMUを

a) katagiri.rintaro@arakawa-lab.com

b) nakamura@ait.kyushu-u.ac.jp

c) arakawa@ait.kyushu-u.ac.jp

固定する手法も検討したが、バッテリーの消費による長期的な計測が厳しいことや、バランスボールで多くある、静的な運動に対して精度が良くないなどの理由から適していない。一方カメラの場合は、カメラの設置場所の確保や、カメラ位置の細かい調整、やプライバシーの課題が存在する。よってこれらに代わる新たな手法が必要になる。

バランスボールを用いたトレーニングの計測において重要な指標となるのは、バランスボールの傾きと、ボールのへこみ具合である。ボールの傾きはボールの移動だけでなく、バランス能力が低い際にみられる細かい振動などの計測に利用することが出来る。またボールのへこみ具合は、ボールに体のどの部分を乗せているかを識別するのに必要となる。豊富なバランスボールトレーニングにおいて、バランスボールに乗せる体の位置は足、臀部、腕などがある。足などの場合はバランスボールは殆どへこまないが、臀部の場合は、体重をバランスボールにかけるためへこみ具合は大きくなる。よって、この2つを計測できる手法が必要になる。

そこで我々は、磁気センサによるセンシング手法に着目した。これは磁石またはコイルなどによって発生する磁場を磁気センサで計測する手法であり、他の手法と比べて構造がシンプルで磁石から発する磁力線は多くの物体を通過するため高いロバスト性がある [12][13]。しかし、外部の磁場の影響を受けやすいという課題も存在する。

これまで行われている磁気センシングは主に、距離測定 [13] や指 [14] やスマートフォン [15] などの位置推定等に限定されており、トレーニングにおけるセンシング手法は提案されていない。

本研究では、磁器センシングを用いたバランスボールトレーニングのセンシング手法を提案する。先述したように、単にバランスボールトレーニングの内容を計測するだけでなく、トレーニングを行う人のバランス能力も測定することも可能にすることでバランスボールトレーニングにおける包括的な支援を行うことを目標とする。

2. 関連研究

ここでは、関連研究として、デバイスを用いた家でのトレーニングに関する評価や介入を行った研究と磁気センサを用いた計測に関する研究について述べる。

2.1 デバイスを用いた家でのトレーニングに関する評価や介入に関する関連研究

Komarís ら [8] は、対面で行う術後のリハビリテーションプログラムを、患者の家でも同じように実施することを目指して、IMUを用いたデバイスによるリハビリテーションの評価を行った。その結果、2つのパターンでのパフォーマンスは非常に一貫的だったことが分かったが、家でのトレーニングの速度が対面で行うよりも早かったり、動きの

滑らかさが小さい運動もあったことを報告した。

Ishac ら [10] は、近年のリモートワークの増加と少林拳などの武道に関する関心が高まっていることを背景に、IoT 圧力感知トレーニングマットである LifeMat を開発した。圧力マップとパターン認識を使用して武道の主要な姿勢を正確に分類し、フォームに関するフィードバックを提供したり、フォームの不備を検出することが可能で、Ishac らは、LifeMat を「Kung Future」というシリアスゲームに組み込み、フィードバックによって実験参加者のパフォーマンスや持続時間等が向上したことを報告している。しかしこの手法の場合、バランスボールの圧力分布と運動者の圧力分布の2つを識別して計測することになり複雑になってしまう。

Wu ら [2] は、AR ヘッドマウントディスプレイ (HMD) を用いて、ビジュアルフィードバックを行うシステムを提案した。体の動きを測定するカメラと HMD というシンプルなシステムによって家でのトレーニングに適している。バランスボールで HMD を使うと、視界が遮られてしまうことから安全面に問題があるため、トレーニングの制限につながる。

我々の研究グループで開発したスマートグローブ [9] は、多くの運動計測システムが、特定のエクササイズのみに適用的であるという背景から、殆どのエクササイズで体や運動器具に接触する掌に着目し、エクササイズ中に掌にかかる圧力分布を計測することで、トレーニングの特定や回数を識別する手法を提案した。

2.2 磁気センサを用いた計測に関する関連研究

Bian ら [13] は、COVID-19 の流行によって社会的距離 (Social Distance) の確保のために主に利用されていた Bluetooth ベースでの検知システムでは、精度などに課題を抱えているとし、磁気センシングを用いた新たな検知システムを提案した。

Ma ら [14] は指の爪に磁石を、手首に磁気センサがつけられた電子リストバンドを装着し、指の動きを計測する手法を提案した。人差し指に限定して計測を行ったところ、モーションキャプチャによる結果と近い結果が得られた。Ma らはこれらをキーボードやマウスに代わる新たなインターフェースとして利用することを目指している。

Miyatake ら [15] は、デジタルサイネージなどの平面での物体位置の特定手法として、磁石が埋め込まれた平面に磁気センサが埋め込まれたデバイスをかざすことで、その位置を特定する手法を提案した。永久磁石が規則的に配列された平面上に磁気センサが入っているスマートフォンを近づけると磁石によって作られる磁場ベクトルを計測することができる。これを予め測定しておいた磁場ベクトルデータと照らし合わせ、最も近いデータによって推定位置を算出するように設計した。誤差も約 10% と高水準であり、安

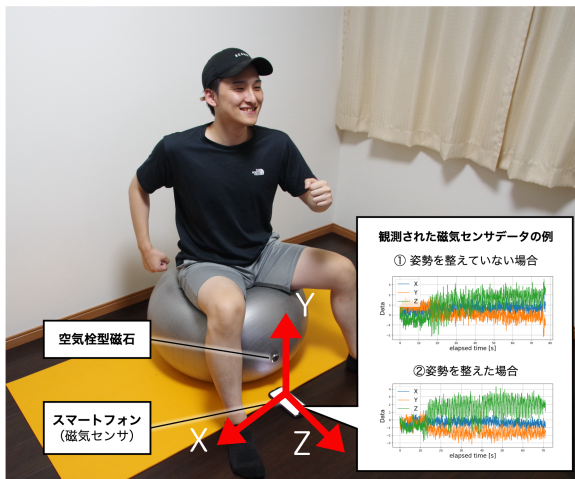


図 1 計測システム

価でかつ実用的なシステムとなっている。このシステムを応用して Miyatake らはルーペアプリケーションを開発した。これは写真や絵が書かれた紙の上においたスマートフォンの位置を算出して、その部分を拡大して表示するアプリケーションである。このように様々なシーンでの応用が見込まれている。

3. 計測システム

本論文における計測システムを、図 1 に示す。バランスボールの空気ピンに磁石を取り付けることが出来るように、空気ピンは 3D プリンターで作成し、円形の磁石を 1 つ取り付けた。磁石の動きを計測するための磁気センサは、スマートフォンアプリ「Sensor Logger」^{*1}を介して、スマートフォンに内蔵された磁気センサを用いる。計測を行う際は、磁石がついた部分を体の正面に向け、その先の床にスマートフォンを置いて、計測を行う。

本研究では、磁気センサによる提案手法と比較するため、加速度センサ (MetaMotionS^{*2}) を図 2 のように磁石の上にテープで固定し、スマートフォンアプリを用いて、3 軸加速度を測定した。

4. 実験

4.1 データの収集

今回の実験の参加者は、23~24 歳の大学生 5 名 (男性 5 名) であった。初めに体重を測定し、実験説明を行った。それぞれの参加者には、ID: 1~5 を振った。

本研究では、今回提案する計測システムによってバランスなどの観点からトレーニングの評価が行えるように、「良い姿勢」と「悪い姿勢」の 2 つでトレーニングを行った。「良い姿勢」では、図 3(a) のように骨盤をまっすぐにし、バランスボールの頂点と頭が一直線になるよう指示をした。一方、「悪い姿勢」では、計測を開始する前に、参加者にス

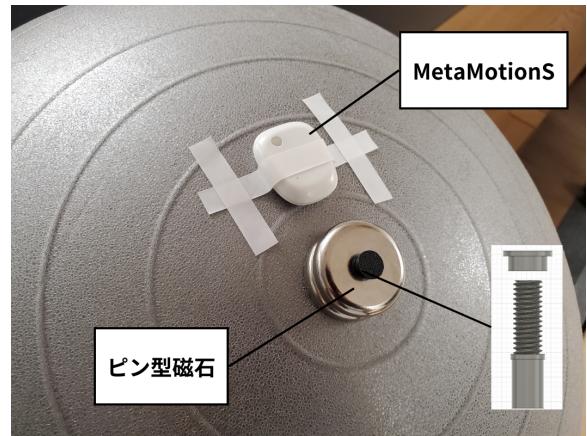
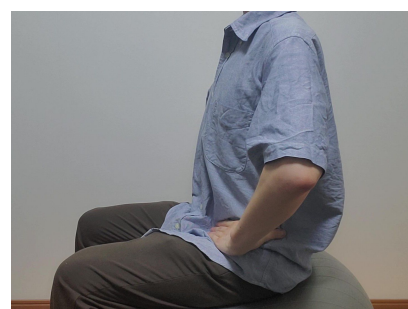
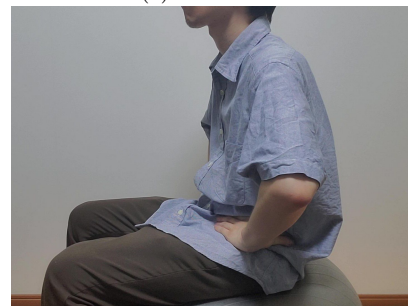


図 2 ピン型磁石と加速度センサ (MetaMotionS) の位置



(a) 「良い姿勢」



(b) 「悪い姿勢」

図 3 姿勢の違い

マートフォンを操作してもらい、図 3(b) のような猫背の姿勢でバランスボールに座るよう指示をした。

バランスボールトレーニングの種類に関しては、バランスボールトレーニングによるバランス能力の向上を報告した研究 [6][7] や Youtube にアップロードされているトレーニング動画を参考にし、トレーニング初心者でも比較的取り組みやすいトレーニングとして、図 4 に示す 6 種類を選択した。各トレーニングの内容を以下に示す。

(a) Sitting

バランスボールに座り、腰を手にあてた状態で姿勢をキープする。

(b) Leg Extension

バランスボールに座り、腰に手をあてた状態で右足を前に伸ばす。3 秒で伸ばし、3 秒で戻す。

(c) Knee Up

*1 <https://www.tszheichoi.com/sensorlogger>

*2 <https://mbientlab.com/metamotions/>



図 4 バランスボールトレーニングの名称とその内容

バランスボールに座り、腰に手をあてた状態で右足を上に上げる。3秒で上げて、3秒で戻す。

(d) Bounce

バランスボールに座り、腰に手をあてた状態で上下に跳ねる。バランスボールから浮くまで跳ねる必要は無く、リズムに関しては自由にしてもらった。

(e) Walking

Bounceと同じように跳ねながら、腕を前後に振る。

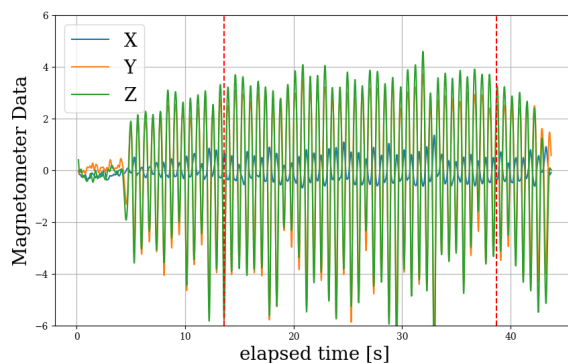
(f) Rolling

バランスボールに座り、腰に手を当てた状態で腰を時計回りに回転させる。

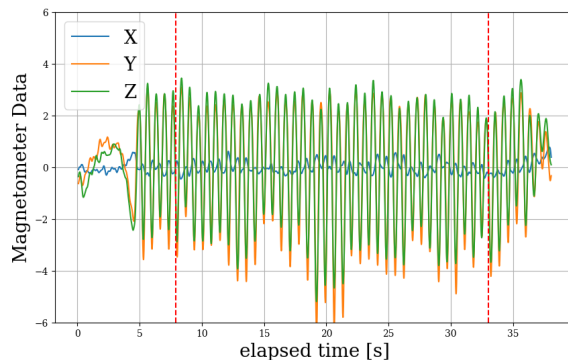
トレーニングの順番による影響を避けるため、6種類のトレーニングはランダムな順番で行った。1セットの内容は、6種類のトレーニングを「良い姿勢」「悪い姿勢」でそれぞれ30秒行うというもので、これを3セット行った。

4.2 データの処理

磁気センサによって計測されたデータの一例を図5、6に示す。今回の測定では、2つのセンサを別々のアプリで制御していたため、計測開始・終了時間が異なっていたり、各データの中に、測定開始時と終了時でのトレーニングとは関係のないデータが含まれていた。そこで、各セッションにおける磁気センサデータと加速度センサデータにおいて、共に計測していた時間のデータを取り出した後、最後から5秒間のデータを削除し、そこから25秒間のデータを抽出した(図5、6の赤点線で囲われた部分)。これにより、抽出したデータは全てトレーニングを行っている際のデータになるようにした。今回の実験では、各センサのサンプリング周波数は約100Hzであった。しかし、実際の



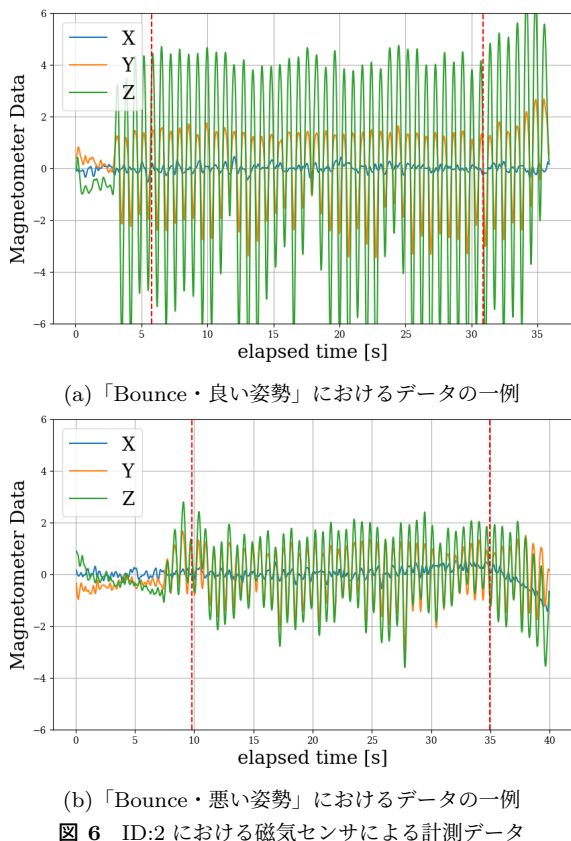
(a) 「Bounce・良い姿勢」におけるデータの一例



(b) 「Bounce・悪い姿勢」におけるデータの一例

図 5 ID:1 における磁気センサによる計測データ

データを確認した所、磁気センサのデータに関しては、1秒間のデータが100個からずれていることがあった。そこでまず、1秒間あたりのデータが100個になるよう線形補完を行った。次に、0.05-3 Hzのバンドパスフィルタを適用し、その後、ウィンドウ幅5秒、20%のスライディングウィンドウを適用して、データの分割を行った。その後、各時系列データと周波数解析したデータから特徴量をそれ



ぞれ、18 個ずつ算出した。

4.3 使用した学習モデルと交差検証の手法

識別を行うために、機械学習モデルとして、ランダムフォレスト (RF)、サポートベクターマシン (SVM)、k 近傍法 (kNN)、LightGBM を用いた。また、交差検証の手法として、K-Fold (訓練データ：90% テストデータ：10%)、LOSO (Leave-One-Session-Out)、LOPO (Leave-One-Person-Out) の 3 つを用いた。

5. 結果・考察

5.1 各トレーニングに関する識別

4 つのモデルと 3 つの交差検証における識別精度の結果を図 1 に示す。K-Fold の場合、磁気センサデータを用いた LightGBM が精度 94.7% で、LOSO では加速度センサデータを用いた RF で 62.3%、LOPO では加速度センサデータを用いた RF で 65.2% であった。LOPO は、1 人分のデータのテストデータとして用いるため、このシステムの実用化における重要な指標となる。結果では、磁気センサデータよりも加速度センサデータの方が、精度が良くその差は約 5% であった。図 7 は磁気センサデータを用いた LightGBM の結果に関する混合行列であり、これを見ると、「Leg Extension」と「Knee Up」、「Bounce」と「Walking」の識別精度が低いことが分かる。図 4 で示したように、これらはトレーニング内容が似ており、この結果は想定内で

あった。よって、LOPO であっても、内容が似ていないトレーニングを選択することで高い精度が得られる可能性は高い。

5.2 姿勢に関する識別

先程と同様に、各組合せにおける識別精度の結果を図 2 に示す。K-Fold の場合、磁気センサデータを用いた RF が精度 98.4% で、LOSO では磁気センサデータを用いた LightGBM で 80.6%、LOPO では磁気センサデータを用いた RF で 59.7% であった。全体的な評価としては、磁気センサの方がやや優れていた。計測を行う際に、姿勢の指示をしたが、姿勢は各個人で異なっているため、LOPO では磁気センサデータ・加速度センサデータ共に精度が下がってしまったと考えられる。

5.3 特徴量重要度

磁気センサデータを用いた LightGBM による LOPO において、それぞれの識別における特徴量重要度を算出した結果を 8、9 に示す。スマートフォンアプリの磁気センサの各軸の方向としては、図 1 のようになっており、これと照らし合わせると、トレーニング識別の場合、磁石の上下の動きや前後の動きが識別に大きく影響していることが分かる。これは、バランスボールのへこみ具合を表しており、今回の提案手法で計測出来たことが確認できた。図 5、6 を見ると分かるように、姿勢が良い時の方が、磁気センサデータの波形の振幅が大きいことが分かる。姿勢が良い時は、バランスボールの頂点に体重が乗せられているため、このような違いが生まれたと言える。また、姿勢識別の場合では、X 軸方向の動きが識別に影響しており、バランスボールトレーニングで姿勢が悪い際には左右に傾いてしまうことが分かる。これは普段のバランスボールトレーニングでも頻繁に起こることで、提案システムで計測出来ることが分かった。

5.3.1 提案システムの改善点について

提案システムでは、円形の磁石を用いてバランスボールの空気ピンに取り付け、磁気センサが内蔵されたスマートフォンを磁石の正面の床において計測を行った。磁石が作り出す磁界を確認してみると、参加者がボールに座った正面方向の磁界であったため、バランスボールが 3 軸方向に動いた際に、地面に置いた 3 軸磁気センサにおいて、特に横方向の動きが追いつかない。ピン型磁石の形状を検討することで、より精度のよい計測が実現する可能性がある。

6. おわりに

最後に、本研究の成果、今後の展望について述べる。

6.1 本研究の成果

本研究では、バランスボールのトレーニング評価をユー

表 1 各データによるトレーニング識別精度

モデル	磁気センサデータ			加速度センサデータ		
	K-Fold	LOSO	LOPO	K-Fold	LOSO	LOPO
RF	90.3%	46.1%	60.1%	87.8%	62.3%	65.2%
SVM	68.8%	50.6%	51.1%	75.9%	63.4%	62.3%
KNN	63.3%	52.1%	55.1%	72.7%	64.3%	64.7%
LightGBM	94.7%	46.2%	59.6%	90.7%	61.7%	64.4%

表 2 各データによる姿勢識別精度

モデル	磁気センサデータ			加速度センサデータ		
	K-Fold	LOSO	LOPO	K-Fold	LOSO	LOPO
RF	98.4%	78.1%	59.7%	90.1%	54.9%	57.1%
SVM	76.3%	63.1%	53.2%	66.7%	51.9%	51.7%
KNN	61.4%	51.4%	54.9%	57.2%	48.0%	51.6%
LightGBM	98.2%	80.6%	59.5%	86.6%	53.0%	55.6%

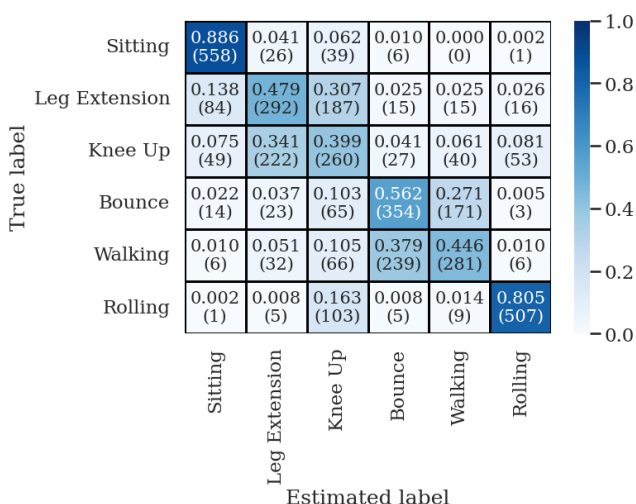


図 7 LOPO でのトレーニング識別に関する混合行列

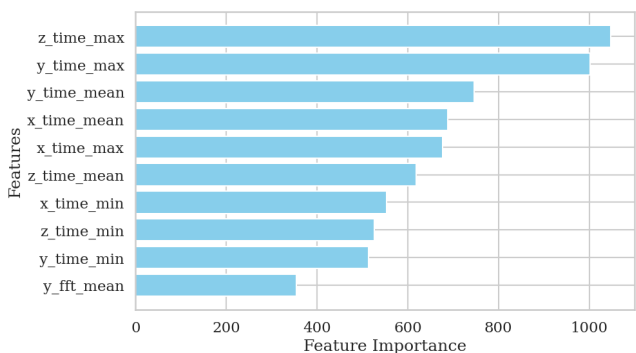


図 8 LOPO でのトレーニング識別に関する特徴量重要度

ザーが負担なく行えることを目指し、磁石と磁気センサを用いた手法を提案し、実装を行った。計測システムは、バランスボールに取り付けたピン型磁石と、スマートフォンに内蔵された磁気センサを用いており、6種類のバランスボールトレーニングを加速度センサと同時に計測してトレーニング内容と姿勢の識別精度を比較した。その結果、トレーニングの識別に関しては、加速度センサの方が精度

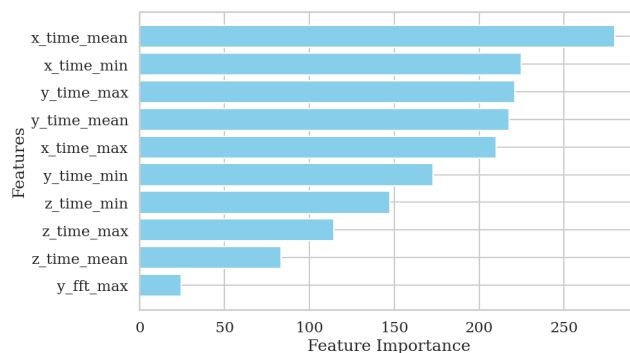


図 9 LOPO での姿勢識別に関する特徴量重要度

が良く、姿勢識別においては、加速度センサより提案手法の方が精度が良かった。前節でも述べたように、今回の提案手法は、バランスボールの横方向の動きの計測精度が悪いため、これを改善すれば、バランスボールトレーニングの計測において、加速度センサによる計測よりも適した計測手法になる。また、姿勢の識別に関して、バランスボールトレーニングにおける個人毎の姿勢が異なっていることから、LOPO では全体的に精度が悪かった。「悪い姿勢」でのバランスボールトレーニングは非常にやりにくいため、時々「良い姿勢」になっていた可能性が考えられる。本研究では、猫背の状態を「悪い姿勢」と定義したが、実際は、ボールのどの部分に体を乗せているかなどによっていくつかの悪い姿勢のパターンがある。よって今後の研究においては、バランスボールトレーニングにおける姿勢の定義をより明確にして計測を行う必要がある。

6.2 今後の展望

まずは、姿勢識別を高い精度で行うことが出来るようにシステムを改善する必要がある。バランスボールトレーニングにおける良い姿勢の定義を計測データから定量化し、ピン型磁石の改善や配置などの更なる検討を行う予定である。また今回は、トレーニングや識別の精度を確認するこ

とを目的としていたので、実際に存在するセンシングアプリを用いてバランスボールトレーニングを行ったが、将来的には、バランスボールトレーニング専用の計測・介入アプリが必要になるためその開発を進める。そして、アプリを通じてバランスボールトレーニングに関する一連のテストを設計し、アプリ上で各個人のバランス能力に関するスコアを算出してトレーニングの提案を行い。長期的なトレーニングによってバランス能力の向上を目指す。

謝辞 本研究の一部は、JST さきがけ (JPMJPR21P7) の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Bagherian, S., Ghahfarrokhi, M. M. and Banitalebi, E.: Effect of the COVID-19 Pandemic on Interest in Home-Based Exercise: An Application of Digital Epidemiology, *International Journal of Epidemiologic Research*, (online), DOI: 10.34172/IJER.2021.08 (2021).
- [2] Wu, Y., Yu, L., Xu, J., Deng, D., Wang, J., Xie, X., Zhang, H. and Wu, Y.: AR-Enhanced Workouts: Exploring Visual Cues for At-Home Workout Videos in AR Environment, *Proceedings of the 36th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 1–15 (2023).
- [3] Chen, X., Li, Y., Chen, J., Li, J., Wang, C. and Tang, P.: Enhancing Home Exercise Experiences with Video Motion-Tracking for Automatic Display Height Adjustment, *Proceedings of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–13 (2024).
- [4] Nuhmani, S.: Efficacy of dynamic Swiss ball training in improving the core stability of collegiate athletes, Vol. 9, pp. 9–15 (online), DOI: 10.16926/PAR.2021.09.02 (2021).
- [5] Sukalinggam, C., Sukalinggam, G., Kasim, F. and Yusof, A.: Stability ball training on lower back strength has greater effect in untrained female compared to male, *Journal of human kinetics*, Vol. 33, No. 2012, pp. 133–141 (2012).
- [6] Dehkordi, S. N., Amini, M., ShahAli, S. et al.: Effect of Swiss ball stabilization training on trunk control, abdominal muscle thickness, balance, and motor skills of children with spastic cerebral palsy: A randomized, superiority trial, *Archives of physical medicine and rehabilitation*, Vol. 104, No. 11, pp. 1755–1766 (2023).
- [7] Saberian Amirkolaei, A. A., Balouchy, R. and Sheikhho-seini, R.: The effect of eight-week Swiss ball training on the integration of functional movements and balance of teenage badminton players, *Journal of Rehabilitation Sciences & Research*, Vol. 6, No. 4, pp. 153–159 (2019).
- [8] Komaris, D.-S., Tarfali, G., Brendan O' Flynn, Tedesco, S.: Unsupervised IMU-based evaluation of at-home exercise programmes: A feasibility study, *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, Vol. 14, No. 1, p. 28 (2022).
- [9] Akpa, A., Fujiwara, M., Suwa, H., Arakawa, Y., Yasumoto, K. et al.: A smart glove to track fitness exercises by reading hand palm, *Journal of Sensors*, Vol. 2019.
- [10] Ishac, K., Bourahmoune, K. and Carmichael, M.: An IoT sensing platform and serious game for remote martial arts training, *Sensors*, Vol. 23, No. 17, p. 7565 (2023).
- [11] Hülsmann, F., Göpfert, J. P., Hammer, B., Kopp, S. and Botsch, M.: Classification of motor errors to provide real-time feedback for sports coaching in virtual reality —A case study in squats and Tai Chi pushes, *Computers & Graphics*, Vol. 76, pp. 47–59 (2018).
- [12] Bian, S., Liu, M., Zhou, B. and Lukowicz, P.: The state-of-the-art sensing techniques in human activity recognition: A survey, *Sensors*, Vol. 22, No. 12, p. 4596 (2022).
- [13] Bian, S., Zhou, B. and Lukowicz, P.: Social distance monitor with a wearable magnetic field proximity sensor, *Sensors*, Vol. 20, No. 18, p. 5101 (2020).
- [14] Ma, Y., Mao, Z.-H., Jia, W., Li, C., Yang, J. and Sun, M.: Magnetic hand tracking for human-computer interface, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 47, No. 5, pp. 970–973 (2011).
- [15] Miyatake, Y., Liang, R.-H., Chen, B.-Y. and Siio, I.: FieldSweep: a 2D tracking system with embedded magnets and a smartphone, *Extended Abstracts of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–6 (2021).