

複数台深度カメラを用いた複合現実ウェアラブルゲームによる 身体バランス評価

Body Balance Evaluation Using Mixed Reality Wearable Game with Multiple Depth Cameras

○反町優平, 沓澤京, 大脇大, 林部充宏

○Yuhei Sorimachi, Kyo Kutsuzawa, Dai Owaki, Mitsuhiro Hayashibe

東北大学

Tohoku University

キーワード: 複合現実 (Mixed Reality), モーションキャプチャ (depth sense), 身体バランス (Body balance), リハビリテーション (Rehabilitation)

連絡先: 〒 980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01 東北大学 青葉山キャンパス 機械系共同棟
503 反町優平 Tel.:022-795-6970 Fax.:022-795-6971 E-mail: yuhei.sorimachi.q1@dc.tohoku.ac.jp

1. 緒言

現在日本では高齢化が進み, 超高齢社会へと突入している. 高齢者は加齢による運動機能の低下により転倒リスクが高くなることが知られている. 高齢者の転倒は, 骨折や頭部外傷などの大けがにつながりやすい. 転倒のリスクを低下させるためにはバランス能力の維持を目的としたリハビリテーションが有効である. 現状のリハビリテーションは, 療法士と患者が一对一で行われることが多いため限られた時間の中でリハビリを行う必要がある. また, リハビリの評価は療法士の知識や経験に基づくものが多く, 療法士の負担は大きくなっている. 近年では, 需要の増加に伴い理学療法士・作業療法士の養成数は増加している¹⁾. 一方で, 現場では療法士の増加に伴う質の低下が懸念されている²⁾. こうした問題解決のために, 運動評価の自動化

や定量的なデータに基づくリハビリ評価などによって療法士の負担を軽減させることが重要である.

バランスリハビリテーションでは, モーションキャプチャを利用した運動機能評価が行われてきた. 小嶋ら³⁾は深度カメラを用いて定量的なバランス評価を可能にするゲームを開発した. Pezzeraら⁴⁾は深度カメラとバランスボードから取得した重心と床反力を Mixed Reality (MR) デバイスを用いてグラフ化するシステムを開発した. これらの研究では, モーションキャプチャを一台の深度カメラで行っている. 深度カメラは安価でありマーカレスで使用できるため, 手軽に使用できるモーションキャプチャ機器として知られている. 一方で, 対象が障害物によってカメラから隠されることでトラッキングが不正確になるという問題点がある. ゆえに, 先行研究では被験者の動きがトラッキングしや

すい運動に限られている。また、小嶋ら³⁾の研究では、スクリーンを用いて運動の目標位置を提示している。スクリーンのような平面では、前後方向を含む三次元的な運動を誘導することは難しい。

そこで本研究では、深度カメラを用いて従来と比べて自由度の高い動きを可能とするバランス機能評価システムを実現することを目的とする。この目的を達成するために、二台の深度カメラを用いたモーションキャプチャとMRデバイスを用いたバランス評価ゲームを作成した。複数台の深度カメラを用いることでトラッキング可能な範囲を拡大することを目指した。また、MRデバイスを用いることで、ゲーム内で実空間における三次元的な動きの運動タスク指示を可能にしている。そして、バランスゲーム中のトラッキング精度について検証実験を行った。さらに、ゲーム後に深度カメラから得られたデータに基づいたバランス機能評価も行った。

2. 手法

2.1 システム概要

本研究で開発したシステム概要を図1に示す。被験者は、MR-HMD(Head Mounted Display)デバイスを装着してゲームを行う。そして、ゲーム中の様子を被験者の前後に設置した二台の深度カメラを用いてモーションキャプチャする。深度カメラから得られた関節の位置情報を基に被験者のバランス能力を定量的な評価を行う。MRバランスゲーム、モーションキャプチャ、バランス機能評価についてそれぞれ説明する。

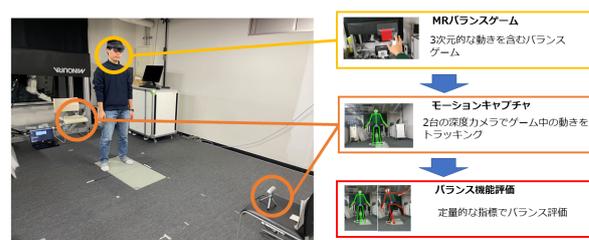


Fig. 1: System overview chart

2.2 Mixed Reality (MR)

MRとは、現実世界の視界に対して仮想の物体を重ねて表示する技術である。MRでは仮想物体に触れて相互作用を行うことが可能である。現実世界の視界を維持しながら三次元的な動きを行うことができるため、MRはリハビリテーションの分野で注目を集めている。MRはVirtual Reality (VR)とは異なり、現実世界の物体との相互作用や周囲の環境の認識が可能である。MR技術を用いることでコントローラを用いることなく普段と同様の動きでリハビリに取り組むことができる。

本研究では、MR-HMDデバイスであるMicrosoft社のHoloLens2⁵⁾を用いてMRバランスゲームを行った。HoloLens2は透過型ホログラフィックレンズを通して現実の視野に対して仮想のオブジェクトを表示することができる。IMU、深度カメラ、赤外線カメラ等のセンサを搭載しており、周辺の空間をマッピングすることでジェスチャーでの操作が可能である。また、PCなどのコンピュータやバッテリーにつなげる必要が無いため、装着した状態で自由に動き回れるという特徴を持つ。

2.3 MR バランス評価ゲーム

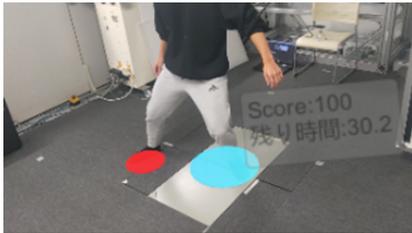
バランス評価のため図2に示すリーチとステップのMRゲームを作成した。リーチは前方に現れるオブジェクトを足を動かさずに順番にタッチしていくゲームである。オブジェクトは被験者の正面と左右30°、60°の角度の5方向に出

現する。時間は45秒間、左右の手でそれぞれ行う。ステップは、前方に現れる円形のオブジェクト領域に順番に足を動かしていくタスクである。こちらも正面と左右30°、60°の角度の5方向に出現する。時間は45秒間、左右両足でそれぞれ行う。これらのタスクでは、MRを用いることでスクリーンなどに映すゲームでは難しい前後方向の運動指示も可能にしている。

また、MRゲームの座標系と深度カメラの座標を統一するためにARマーカーを用いた。図3に示すように、ARマーカーとして用いるQRコードを深度カメラの後方に向きをそろえて設置する。このQRコードをHoloLens2で認識することで、QRコード上に表示された物体の姿勢・座標を取得して深度カメラ座標へ変換する回転行列を求める。この変換を行うことで深度カメラに対して正面の向きでゲームを開始することができる。



(a) Reach Game



(b) Step Game

Fig. 2: MR balance evaluation game

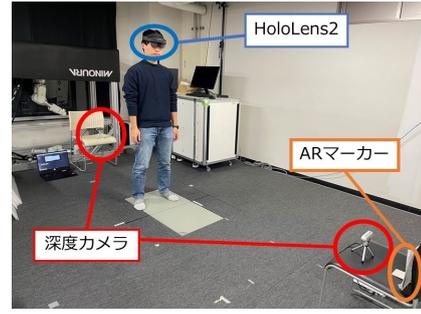


Fig. 3: Motion capture system

2.4 モーションキャプチャシステム

本研究では図3に示すようにMRデバイスを装着した被験者に対して、二台の深度カメラを用いてモーションキャプチャを行った。使用した深度カメラはIntel社のRealSenseD455⁶⁾とRealSenseD435⁷⁾である。

複数台の深度カメラを用いる場合には、それぞれの深度カメラが持つ座標系を統一する必要がある。そこで、本研究では古畑ら⁸⁾のキャリブレーション手法を用いた。この手法では、二台の深度カメラでそれぞれ被験者を撮影して骨格モデルを作成する。そして、RealSenseD435から得られた骨格モデルがRealSenseD455から得られた骨格モデルと重なるような回転行列を最適化によって求める。RealSenseD455座標系の位置 q_i をRealSenseD435の座標系の位置 p_i に変換する座標変換は

$$p_i = cRq_i + t \quad (1)$$

と表される。ここで、 R は回転行列、 t は並進ベクトル、 c はスケール係数である。そして、RealSenseD435座標系からRealSenseD455座標系への座標変換に必要なパラメータ R 、 t 、 c を求めるために、 p_i と q_i の誤差を最小化する最適化問題

$$\arg \min_{R, t, c} \sum_i \|p_i - (cRq_i + t)\|^2 \quad (2)$$

を解くことで、二つの深度カメラ間の座標変換が求められる。

2.5 安定性評価

ゲーム中のバランス機能の評価指標として身体バランスの安定性評価⁹⁾を用いた。この評価指標では、支持基底面の中心と Central Moment Pivot (CMP) 間の距離によって評価される。身体バランスの安定性評価を求める手順を以下に示す。

- 1) 重心の計算
- 2) CMP の計算
- 3) 支持基底面の計算
- 4) Stability Index の計算

これらの計算についてそれぞれ説明する。

2.5.1 重心の計算

重心の計算には、Segmental Method¹⁰⁾ という手法を用いる。この手法では、全身を14個の部位に分けてそれぞれの Center of Mass (CoM) を足し合わせることで全身の CoM を求める。全身の CoM の x 座標は、

$$x_{CoM} = \frac{\sum (m_{seg_i} \cdot x_{CoM_i})}{\sum m_i} \quad (3)$$

と表される。 x_{CoM} は CoM の x 座標、 m_{seg_i} は身体各部位の質量、 x_{CoM_i} は身体各部位の CoM の x 座標、 $\sum m_i$ は全身の質量を表す。

身体各部位の x_{CoM_i} は、Body Segment Parameters (BSP) という人体計測データを用いる。本研究では Leva¹¹⁾ による BSP を用いる。身体各部位において、胴体に近い側の端を近位端、その反対側を遠位端とし、近位端と遠位端の x 座標をそれぞれ x_p, x_d とする。 x_{CoM_i} が身体部位に対して、その近位端からどの割合に位置するかを %CoM とすると、BSP に基づき、 x_{CoM_i} は次式で求められる。

$$x_{CoM_i} = x_p + \frac{\%CoM}{100} \cdot (x_d - x_p) \quad (4)$$

同様にして、 y 座標と z 座標についても求められる。

2.5.2 CMP の計算

CMP は、床反力と平行で重心を通る直線と床が交わる点であり、重心角運動量の変化率がゼロとなるように設定される点である。この点が支持基底面よりも外側にあるときに、身体のバランス維持が困難となる。CMP p_f は以下の式で表される。

$$p_f = \frac{(p_0 - c) \cdot n}{f \cdot n} f + c \quad (5)$$

$$f = M(\ddot{c} - g) \quad (6)$$

ここで、 c は身体重心の座標、 p_0 は地面上の点、 f は床反力ベクトル、 n は床面に垂直なベクトル、 M は総質量、 g は重力加速度である。式(6)により床反力を重心の加速度から近似することで床反力計を用いずにバランス状態を評価できる。

2.5.3 支持基底面の計算

支持基底面とは、体重を支えるために床と接している部分で囲まれた範囲のことである。支持基底面には、床に接地している足を囲む最小の楕円 MVEE (Minimum Volume Enclosing Ellipsoid)¹²⁾ を用いた。MVEE から楕円の大きさや角度などの情報を含む 2×2 行列 A と中心点 c_o が得られる。

2.5.4 Stability Index の計算

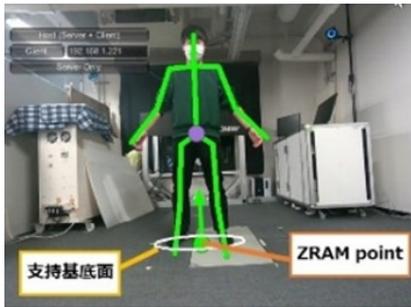
CMP p_f と中心点 c_o の距離 $d_{A,c_o}(p_f)$ は、

$$d_{A,c_o}(p_f) = \sqrt{(p_f - c_o)^T A (p_f - c_o)} \quad (7)$$

で表される。 $d_{A,c_o}(p_f)$ は CMP p_f 中心点 c_o と重なっているときは0、MVEEの周上にあるときは1となる。評価指標 Stability Index $s \in [0,1]$ は

$$s = \min(d_{A,c}(p_f), 1) \quad (8)$$

と定義される. Stability Index s が 0 のとき最もバランスが良く, 1 のとき最もバランスが悪いという評価となる. 身体バランスが安定である場合と不安定である場合の姿勢の例を図 4 に示す.



(a) Stable body balance



(b) Unstable body balance

Fig. 4: Examples of body balance stability assessment

3. 実験

3.1 トラッキング性能

二台の深度カメラを用いた場合に, 一台の場合と比較してどの程度モーションキャプチャ性能が向上するか確認するための実験を行った. リーチ, ステップの各 MR ゲームを 10 回ずつ行い, 深度カメラで検出できる 19 個の関節をすべて検出できた時間の割合で性能を評価した. 二台の深度カメラを用いる場合には, 被験者に対して正面と右側, 正面と左側, 正面と後方の三パターンの配置で行った.

その結果を図 5 に示す. 全体として深度カメラ二台を用いたときは一台の時と比べて精度が上昇した. また, 正面と左側に深度カメラを設置した場合には, 右手リーチと右足ステップのタスクにおいて, 一台の場合と比較して大きく精度が向上した. しかし, 左手リーチと左足ステップのタスクでは, 右手右足のときほど精度は向上しなかった. 一方で, 正面と右側に設置したときには, 左手リーチと左足ステップのタスクでは大きく精度が向上し, 右手リーチと右足ステップのタスクではそれほど精度は向上しなかった.

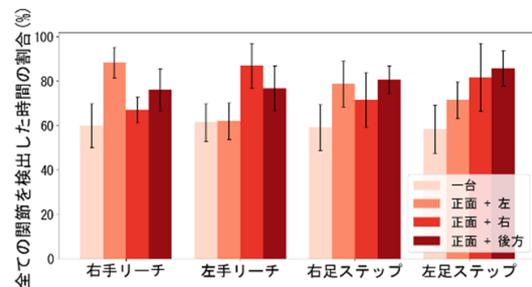


Fig. 5: Percentage of time all joints were recognized in each game

図 6, 7 にある一回のステップゲームにおいて, 深度カメラ一台と被験者の前後に設置した二台の深度カメラで測定したそれぞれの重心軌跡を示す. 重心の xz 軌跡を比較すると一台の深度カメラでは 3 つの方向にのみ軌跡が現れているのに対し, 二台の深度カメラでは 5 つの方向に軌跡が現れている. このことから被験者の前後に深度カメラを設置した場合は一台の深度カメラでは確認できない 5 方向すべてのステップングが定量化できていることが分かる.

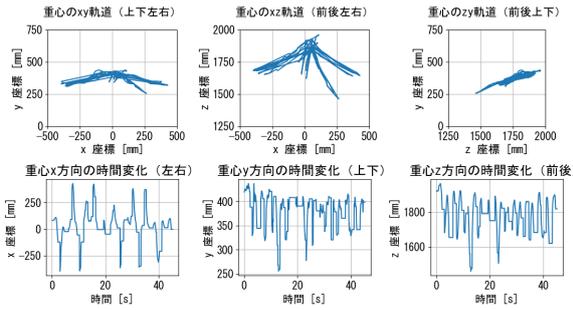


Fig. 6: Center of gravity trajectory measured by one depth camera

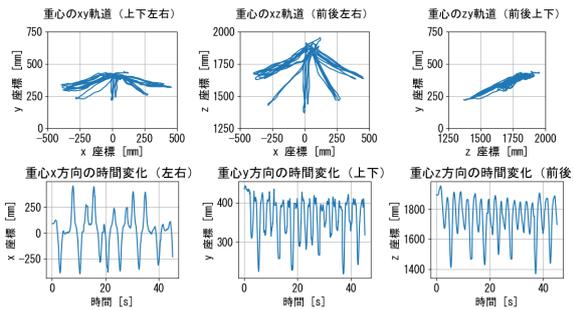


Fig. 7: Center of gravity trajectory measured by two front and behind cameras

3.2 バランス機能評価

MR ゲームの難易度を変えてバランス評価を行い、本システムで被験者のバランス状態を適切に評価できているか確認する実験を行った。

作成したMR バランスゲームを、通常の状態とウェイトを付けた状態プレイしてそれぞれ身体バランスの安定性評価を測定した。被験者は成人男性5人（平均年齢 22.4 ± 0.5 歳）である。リーチでは0.67kgのウェイトを両手首に、ステップでは1.82kgのウェイトを両足首に装着した。図8は各ゲームにおける被験者5人の Stability Index の平均を表している。すべてのタスクにおいて Stability Index はウェイト有りの場合の方が大きい値となった。ゆえに、ウェイトを装着した場合の方が不安定であるという評価が得られた。

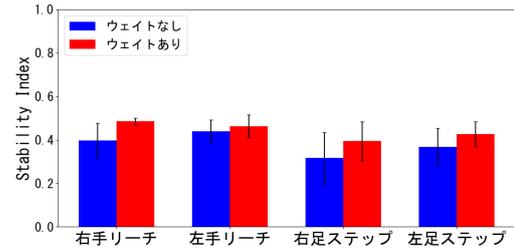


Fig. 8: Evaluation of body balance stability with and without weight

4. 考察

二台目の深度カメラを被験者の左右に設置した場合に、左右のタスクでモーションキャプチャ性能に差が出たのは、バランスゲームに身体をひねる動きが含まれるためだと考えられる。リーチ、ステップの各ゲームでは手足を前方5方向の目標へと移動させている。ゆえに、右手右足を斜め左方向に動かすとき、左手左足を斜め右方向に動かすときに身体をひねる動きとなる。深度カメラは正面から撮影したときに最も精度が高くなる。そのため、深度カメラの方向へ身体をひねったときには精度が大きく上昇したのだと考えられる。一方、反対側へひねったときには身体に隠される関節が多くなり精度が向上しなかったのだと考えられる。被験者の前後に設置したときにはタスクの左右にかかわらず精度が向上しており、深度カメラを二台用いる際には被験者の前後が最適な配置だと考えられる。

図6, 7の重心軌跡を比較すると、深度カメラ一台では3方向にのみ軌跡が現れているのに対して、深度カメラを被験者の前後に設置した場合には5方向すべてのステップが定量化できている。このことから、二台の深度カメラを用いることでトラッキング可能な範囲が拡大していることが示された。重心の時間変化のグラフでは、深度カメラ一台ではトラッキングできず値が変化していない時間が所々に見られる。一方、深度カメラ二台の場合では、常に値が変化しているように見える。このことから、二台

の深度カメラを用いることでモーションキャプチャ性能が向上していることが確認できる。

ウェイトを装着すると、手足を挙げて維持する動きにおいてバランスを保つことが難しくなる。よって、ウェイト有りの場合の方が通常よりも不安定であるという評価が予想される。図8からウェイト有りのとき、通常時と比較してバランス状態が不安定であるという結果が得られた。したがって、MR バランスゲームと二台の深度カメラを用いて、定量的に被験者のバランス評価を行うことが可能であることが示された。

5. 結言

MR デバイスを用いたバランスゲームを開発し、身体バランスの安定性評価の指標を用いてバランス機能評価を行った。MR を用いたゲームにより実空間上での運動目標を提示可能とした。また、二台の深度カメラによるトラッキングにより従来と比べて広範囲の動きをトラッキングし、バランス状態を定量的に評価ができることを示した。より日常に近い動きでのバランス評価ができたことで将来的に実際のリハビリテーション現場での活用が期待できる。

今後の課題として、座った状態でのバランスリハビリテーションにMRを活用することや、HoloLens2を用いてリアルタイムでバランス状態を評価できるシステムの開発が考えられる。

参考文献

- 1) 日本理学療法士協会. 理学療法士国家試験合格者の推移. <https://www.japanpt.or.jp/activity/data/>. (Accessed on 21/02/2023).
- 2) 山田洋一, 丸山仁司. 理学療法士の自己認識から抽出した今後の育成課題 -医療機関に勤務する理学療法士の調査, 2012.
- 3) Moeko Kojima, Kyo Kutsuzawa, Dai Owaki, and Mitsuhiro Hayashibe. Game-based evaluation of whole-body movement functions with com stability and motion smoothness. In *2022 44th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, pp. 4354–4357, 2022.

- 4) Manuel Pezzera, Eleonora Chitti, and N. Alberto Borghese. Mirarts: A mixed reality application to support postural rehabilitation. In *2020 IEEE 8th International Conference on Serious Games and Applications for Health (SeGAH)*, pp. 1–7, 2020.
- 5) Microsoft. HoloLens2. <https://www.microsoft.com/ja-jp/hololens/hardware>. (Accessed on 22/02/2023).
- 6) Intel. Intel realSense depth camera d455. <https://www.intelrealsense.com/depth-camera-d455/>. (Accessed on 22/02/2023).
- 7) Intel. Intel realSense depth camera d435. <https://ark.intel.com/content/www/jp/ja/ark/products/128255/intel-realsense-depth-camera-d435.html>. (Accessed on 22/02/2023).
- 8) Kazuki Furuhata, Kyo Kutsuzawa, Dai Owaki, and Mitsuhiro Hayashibe. Systematic motion integration with multiple depth cameras allowing sensor movement for stable skeleton tracking. In *2022 44th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, pp. 1801–1804, 2022.
- 9) M. Hayashibe, A. González, and P. Fraisse. Chapter four - personalized modeling for home-based postural balance rehabilitation. In Jun Ueda and Yuichi Kurita, editors, *Human Modelling for Bio-Inspired Robotics*, pp. 111–137. Academic Press, 2017.
- 10) Joseph Hamill and Kathleen M Knutzen. *Biomechanical basis of human movement*. Lippincott Williams & Wilkins, 2006.
- 11) Paolo De Leva. Adjustments to zatsiorsky-seluyanov's segment in inertia parameters. *J biomech*, Vol. 29, No. 9, pp. 1223–1230, 1996.
- 12) Michael J. Todd and E. Alper Yildirim. On khachiyan's algorithm for the computation of minimum-volume enclosing ellipsoids. *Discrete Applied Mathematics*, Vol. 155, No. 13, pp. 1731–1744, 2007.