



アバターを用いた VR 介入による歩行と姿勢の改善支援に関する研究

神田洸士¹⁾, 桐山伸也¹⁾, 水野拓宏²⁾, 石川翔吾¹⁾, 寺島広樹¹⁾, 藤田憲一郎³⁾

Koji KANDA, Shinya KIRIYAMA, Takuhiro MIZUNO, Shogo ISHIKAWA, Hiroki TERASHIMA and Kenichiro FUJITA

1) 静岡大学 (〒432-8011 静岡県浜松市中央区城北 3-5-1, kiri@kirilab.net)

2) 株式会社アルファコード (〒113-0034 東京都文京区湯島 3-1-3 MS ビル, mizuno@alphacode.co.jp)

3) けんごろう鍼灸整骨院 (〒432-8011 静岡県浜松市中央区城北 3-5-1, kengorou56@gmail.com)

概要: 本研究は, VR 環境を活用した歩行改善運動プログラムの開発を目指し, 腕振りの特徴に基づく歩行状態の評価を検証する. 特に, センサデータの分析に重点を置き, 「腕振りの高さ」と「前振り横振り」の自動検出手法を開発し, 14 名のデータで評価した. 結果, 腕振りの高さは 11 名で専門家の評価と一致し, 前振り横振りの検出手法は異なる群で有効性が確認された. 今後は足や体全体のバランスも含めた評価手法の改善を進める予定である.

キーワード: VR, 歩行改善, 腕振りセンシング, 自動評価手法

1. 導入

歩行の改善は, 高齢者の生活の質の向上や健康促進において重要な要素となっている.

[1]の研究からも, 歩行訓練においては特定の場所に固定されずに実際に歩行する訓練が最も効果的であることや腕を振ることが重要であることが明らかになっている.

この観点から私たちは, 個々の運動能力や身体特性の多様性を考慮し, 専門家の持つ知識と経験を元に歩行改善のための運動プログラム開発を柔道整復師と協業し進めている.

その一方で, バーチャルリアリティ (VR) 技術の進展は, 新たな歩行改善プログラムの展開を可能にする. 特に, VR 環境下での行動センシングは, 物理的環境を問わずに手軽に行うことができ, 個々の歩行特性を把握するための有用な手段となり得る. そこで, 本研究では, VR 環境の活用を目指している.

その上で, 既存の VR コントローラを用いて手軽にデータ取得を行うことができることから, 腕振りに着目して行うことにする. 腕振りの幅が歩行の安定性に影響する事例 [2]からも, 腕振りについて扱うことが, 歩行の質の向上に与える影響があることを示している.

具体的には, 歩行の特徴として腕振りに着目し, そのセンシングデータから歩行状態の評価がどこまで可能であるかを検証する.

2. VR 環境での歩行データ収集

VR センシングに基づく歩行状態評価の初期検討に必要な基礎データを収集するため, 被験者が VR 環境でコントローラを持って歩行した場面のデータ収録実験を実施した.

2.1 収集機器とプログラム

本研究では, データ収集に Meta Quest Pro の VR ヘッドセットとそれに対応するコントローラを使用する. また, データ収集を可能にするプログラムは, 共同研究パートナーである VR 企業アルファコードが開発したものを使用する. このプログラムは遠隔操作によって被験者の歩行データを収集する機能を持つ.

2.2 データ形式

収集されるデータは 6DoF (6 Degrees of Freedom) 形式である. これは前後, 左右の傾きと回転 (3DoF) に加えて, 前後, 上下, 左右の移動を含む 6 つの動きをカバーする. しかし, 本研究では特に 3 次元座標系に焦点を絞って分析を行う.

2.3 被験者

データ収集の対象者は, 20~23 歳の健康な大学生 (男性 12 名, 女性 2 名) 14 人とする.

2.4 データ収集手順

被験者は, VR ヘッドセットとコントローラを装着した状

態で、10メートルを直線に歩くことが求められる。パスルーと、10mの歩行ガイド線、視界を妨げない位置に配置されたコンソール画面が図1にあるようなVR画面に表示される。

また、先行事例でトレッドミルで歩行時にVRを用いる研究[10]で行った歩行試験も10mであることを参考にし、10mが適切だと判断した。

その間、遠隔操作プログラムが動作し、被験者の手に持つコントローラから6DoFデータが収集される。

その際に、正面からの固定アングルでスマートフォン(POT-LX2J)を用いて映像収録も併せて行った。実際の画面が図2である。

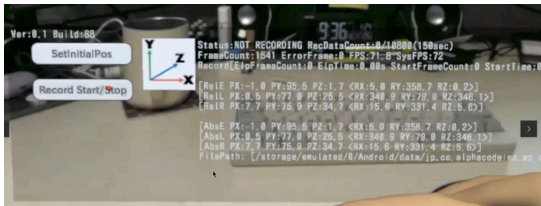


図1：VR画面の様子

3. 腕振りに着目した歩行の状態像評価のための観点の検討

本研究では、共同研究者であり歩行の専門家の知識と見識を活用する。具体的には、歩行指導の専門家にVRヘッドセットを装着した被験者の歩行映像を視察させ、その際の歩行に関する評価をさせる。歩行指導の専門家の評価は本研究の評価尺度の設計に使用される。

専門家に歩行映像と、VRセンシングによって得られた空間座標データをもとにXY(正面)、YZ(横)、XZ(上)の三方向から見た軌跡を提示した。それらをまとめたものが図3である。

専門家が全員分のデータを見て、腕振りを中心に歩行の状態を評価し、特徴をコメントした。

全員分のコメントを考察し、歩行の状態評価に影響を与える腕振りの特徴として「腕振りの高さ」「前振り横振り」を抽出した。

この2つの観点について自動判定技術を開発した。

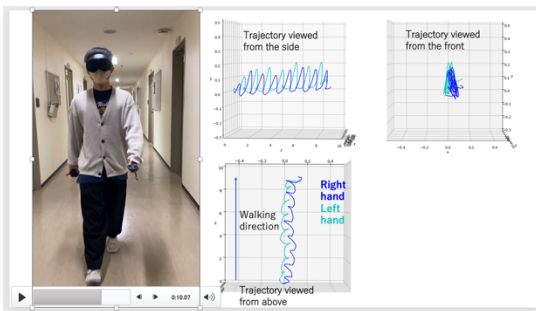


図2：専門家に見せた映像とグラフ

4. 腕振りセンシングに基づく歩行の自動評価技術開発

4.1 専門家の主観による評価データの取得

専門家が日常歩行の評価をする環境を想定し、専門家に被験者の歩行映像のみを視聴させ、4章で抽出した2つの観点で十四人の歩行状態を「良い、やや良い、やや悪い、悪い」の4段階で評価させた。

この歩行の専門家による4段階評価を正解とし、2つの観点について自動評価する手法を設計、開発、評価した。4段階の自動評価は、以下の図4のような、代表値(R)と、それに対する3段階の閾値(T1, T2, T3)を設けることで生成する。

4.2 腕振りの高さに着目した自動評価

4章で示した腕振りの高さに関するコメントから、物理的な振りの大きさが専門家による歩行の状態評価の観点の一つとなっていると推察されたため、これを自動評価の指標とすることにした。

腕振りの大きさの代表値を元に、腕の長さを基準とした閾値処理により、4段階の自動評価を生成する手法を開発した。

1. 周期ごとの腕振りの極大値をpythonで実装したピーク検出プログラムで抽出し、その平均値を算出し、代表値とする。図5のグラフでマークされている値が極大値である。

2. VRゴーグルと左コントローラのY座標の初期値の差を腕の長さの近似値とし、3段階の閾値を設けて、4段階の自動評価を生成する。

3. いくつかの閾値のセットを比較検討し、専門家の正解データと最も近い結果を生成できるものを選定した。

3段階の閾値(T1, T2, T3)は、

$T1 = \text{腕の長さ} * 0.1$, $T2 = \text{腕の長さ} * 0.2$, $T3 = \text{腕の長さ} * 0.3$ (単位はm)と決定した。

腕振りの高さの平均を求め、その高さが、歩行者の腕の長さを元にした閾値を用意し、その値に応じて4段階の評価をつける。

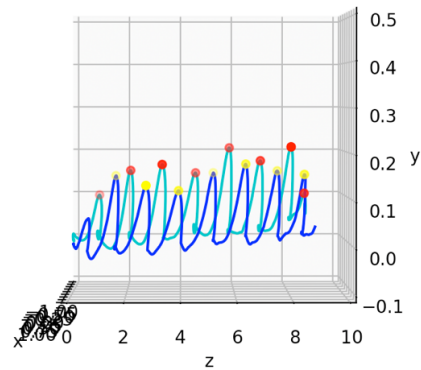


図3：極大値を示したグラフ

4.3 前振りと横振りに着目した自動評価

前振りと横振りの違いは、XY 平面の軌跡を手掛かりに検出する。種々の検出手法がありうるが、今回は二通りの方法を検討した。

4.3.1 X 軸に沿った腕振りの振幅に基づく方法

手の X 軸の幅の代表値を元にして、4 段階の自動評価を生成する手法を開発した。

1. 手の X 軸それぞれの最小値と最大値を python プログラムで求め、その差分を求める。図 6 は、腕振りを XY 軸で見た際の軌跡と、差分を可視化したものである。
 2. 3 段階の閾値を設けて、4 段階の自動評価を生成する。いくつかの閾値のセットを比較検討し、専門家の正解データと最も近い結果を生成できるものを選定した。
- ここで、3 段階の閾値は
 T1=0.1, T2=0.14, T3=0.17(単位は m)とした。

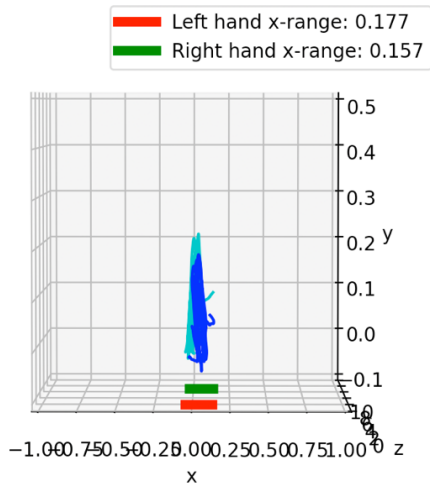


図 4：歩行の軌跡を可視化したものを正面から見た図

4.3.2 腕振りが左右方向に揺れ動く角度に基づく方法

腕振りが肩を基準に左右方向に何度触れ動くかを元に評価する方法を導入した。

腕の高さを縦軸、腕振りの幅を横軸に取り、対角線の角度によって評価する。その角度に対して閾値を設け、4 段階評価をする手法を開発した。

1. ヘッドセットと、手のコントローラの Y 座標の差分を出力
2. 5.2.1 での最大値と最小値の差分を横軸、1 で出力した値を縦軸として構成される 3 角形のうち、図 7 につけた箇所の角度を python プログラムで求める
3. 3 段階の閾値を設けて 4 段階の自動評価を生成する。前段同様、いくつかの閾値のセットを比較検討し、専門家の正解データと最も近い結果を生成できるものを選定した。閾値は T1=17, T2=12, T3=10(度)とした。

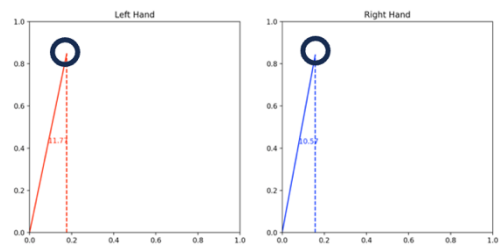


図 5：腕振りの角度をグラフ化した図

4.4 開発手法の評価

専門家による評価を正解とし、開発した 2 つの観点による自動評価手法を評価した。それぞれの手において評価を行い、その平均値を最終的な評価とした。また、評価比較の区分は、完全一致、カテゴリ一致、不一致の 3 種類に分けた。

4.4.1 腕振りの高さ

専門家の評価が一致した事例としなかった事例についての評価をまとめたものと、それに対応する専門家のコメントを、腕振りに関するものだけを抽出して、表 1 に示した。

腕振りの高さの観点では、14 名中完全一致が 9 名、カテゴリ一致まで含めると 11 名の自動検出結果が専門家の評価と一致した。このことから、物理的な振りの大きさが専門家の評価指標に含まれることを確認した。

一方で、腕振りの評価が高い事例や、腕振りそのものにばらつきがあるような人に対しては評価ができていなかった。適切な腕振りの高さの基準が明確になっていないことや、ばらつきを考慮に入れた判定ができていないためである。こういった点について改善の余地がある。

表 1：腕振りの高さに関する自動評価と専門家の評価、コメントまとめ

評価区分	被験者	専門家	自動検出(度)	自動検出(度)	自動検出(平均)	専門家のコメント
完全一致	3	1	1	1	1	1 腕振りの大きさが検出されない。腕にも上がっていない
	4	1	1	1	1	1 腕の振りが無い。
	5	2	1	2	1.5	1.5 腕振りを動かそうという意識がある
	6	1	1	1	1	1 歩み方の癖が検出されていない
	7	2	2	2	2	2 腕振りがゆるゆると揺れている
	8	2	2	2	2	2 腕を、リラックスして歩いている
	12	3	3	3	3	3 高さとは関係ない
13	3	4	3	3.5	3.5 腕振りが大きい	
14	2	2	2	2	2 高さとは関係ない。腕振りにばらつきがある	
カテゴリ一致	2	1	2	2	2	2 右肩が下がっている。高さはほどよい。
	10	3	4	4	4	4
不一致	1	3	2	2	2	2 手振りのような動き。腕には当たらない。腕の振りが大きい。腕の振りが大きい。腕の振りが大きい。腕の振りが大きい。
	9	3	2	2	2	2 左腕の振りに当たっていない感じがする。腕の振りが大きい。
	11	4	2	2	2	2 よく振れている

4.4.2 前振り横振り

前振り横振りの観点では、正面(XY 平面)における①X 軸の触れ幅と②Y 軸に対する振れの角度を特徴量として 2 通りの自動検出手法を試行した。それぞれについて、表 1、表 2 に示す。

腕の幅で評価した場合、腕振りが小さくて横振りの例については正確に評価できるが、あまりにも腕の振りが小さいものや腕の全体の振りが大きく、結果的に横幅への振りが大きいものについては誤評価する可能性があることがわかった。

一方、腕の角度で評価した場合、腕の全体の振りが大き

い事から横幅も大きくなりそうなものについては、少しカバーできるが、腕の長さや腕振りが比例していない場合には対応が難しいことがわかった。

前振り横振りに関する2つの手法を用いた結果が、特徴量として取り出せる観点が一致する群が異なっていることがわかった。その結果、腕振りの幅、腕の角度両方で考慮する手法が有望であると考えられる。

表 2: 腕振りの X 軸の幅に関する自動評価と専門家の評価、コメントまとめ

	専門家	腕振りの幅による評価(左)	腕振りの幅による評価(右)	腕振りの幅による評価(平均)	調査先生の評価
完全一致	2	1	1	1	1 腕振りが入っている。
	3	1	1	1	1 音響は前振、前ゆり、横も振らない
	4	1	1	1	1 腕の振りが無い。左側に体が逃げる
	5	2	2	2	2 右に力が逃げるので、腕振りに。音響が外に聞こえバランスを取る
	9	3	3	3	3 腕甲音が響いていい
カテゴリ一致	14	2	1	1	2.5 2と3の間くらい
	1	3	1	1	1 腕振りが入っていない。
	6	1	4	4	4 歩容の概念がない。
	7	3	1	1	1 腕も振っているけどバランスを取る役割
不一致	8	2	3	3	3 腕振
	10	3	1	1	1 腕振
	11	4	3	2	2.5
	13	3	1	1	1 腕の内側に入っている。

表 3: 腕振りの角度に関する自動評価と専門家の評価、コメントまとめ

	専門家	自動検出(左)	自動検出(右)	自動検出(平均)	調査先生の評価	
完全一致	1	3	3	3	3 - 前振り	
	11	4	4	4	4 - 高さも腕振りの幅も良い	
	14	2	2	2	2 腕振りが入っている	
	9	3	2	4	3 腕甲音が響いていい	
カテゴリ一致	4	1	2	2	2 腕振りが入っていない	
	不一致	2	1	2	3	2.5 腕振り、高さも音響も良いから腕振りが入っている 音響も腕振りが入ってしまう
		3	1	3	2	2.5 腕も振らない
	5	2	4	4	4 - 右に力が逃げるので腕振りに	
	6	1	4	4	4 - ある音の概念があまりない	
	7	3	1	1	1 - 腕振りがいいけどバランスを取る役割	
	8	2	4	4	4 - きれい	
	10	3	1	2	1.5 腕が先行してしまっている	
	12	2	4	4	4 腕振りの正の検出	
	13	3	2	1	1.5 腕振りが腕の内側に入っている	

4.5 専門家の評価コメントの考察

専門家のコメントには、腕振り以外の観点も含まれていた。今回収集した全コメントから専門家が持つ歩行評価の観点について考察した。

1. 腕や体幹の動き

特に手を振る意識や腕振りの前振り、またその幅と高さについては重要視される。肘から下だけの動きや肩甲骨の動きも重要な観察ポイントとなる。

2. 脚の動きと体のバランス：膝下の動き、股関節の動き、X 脚の状態、骨盤の傾き、そして足の接地状態については詳細に観察される。特に股関節が外に開いてしまう動きは、腕を外に逃がしてしまう傾向につながる可能性があると考えられている。

3. 推進力と歩行の安定性：推進力があるか、また腕振りの高さが安定しているか等も評価の重要な要素となる。腕が先行してしまう動きや、腕振りが力んで無駄に動いてしまう動きは、歩行のバランスを崩す要因となると指摘さ

れている。

5. 結論

VR 環境における腕振りに着目した歩行センシング手法を提案した。

「腕振りの高さ」と「前振り横振り」の2つの評価尺度を見出し、それぞれの自動検出手法を開発した。

専門家による主観評価と比較し、開発手法が専門家の持つ歩行評価の一部の観点を自動化できたことを示した。

さらに今回の評価結果は、これまで暗黙的であった専門家が歩行評価をする際に着目している特徴をも明らかにした。

参考文献

- [1] Tanaka Eiichirou, Development of a Whole Body Motion Support Type Mobile Suit and Evaluation of Cerebral Activity Corresponding to the Cortical Motor Areas, 2013
- [2] Fabio A. Barbieri, Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, BRAZIL, The effects of arm swing amplitude and lower-limb asymmetry on gait stability, 2019
- [3] Minori Unno, Yaw-rotational Vestibular Stimulation for Virtual Turning Walking, TVRSJ Vol.27 No.1 pp.29-32, 2022
- [4] Langbehn, E., Lubos, P., and Steinicke, F, Towards Virtual Reality Infinite Walking: Dynamic Saccadic Redirection, ACM Transactions on Graphics, Article No.: 67pp 1-13, 2018
- [5] Shunya Nakamura*1 and Takashi Kawai, Evaluation of Walking Experience on Virtual Environment using Motion Platform, TVRSJ Vol.27 No.3 pp.274-281, 2022
- [6] Yuki Azuma, An Objective Indicator Focused on the Symmetrical Movements of the Arms to Assess Gait Stability, JACIII Vol.23 No.4 pp.767-774(2019)
- [7] Yuji Kumano, Estimating Whole-Body Walking Motion from Inertial measurement Units at Wrist and Heels Using Deep Learning,
- [8] nagaki Takashi, Relationship between gait stability indices and gait parameters comprising joint angles based on walking data from 288 people, 2019
- [9] Ruo Chen LIAO, Health Indicator Estimation by Video-Based Gait Analysis, Volume E104.D Issue 10 Pages 1678-1690, 2021