



人の歩行動作における予測に寄与する動作自由度の解明

Elucidation of the degree of freedom of movement that contributes to prediction of human walking movement

渡部慎太郎¹⁾, 許超舜¹⁾, 牧野泰才¹⁾, 篠田裕之¹⁾

Shintaro WATABE, Chaoshun XU, Yasutoshi MAKINO, and Hiroyuki SHINODA

1) 東京大学 新領域創成科学研究科 複雑理工学専攻 (〒 277-8561 千葉県 柏市 柏の葉 5-1-5)

概要: VR 空間内で多くのアバターが移動する場合, 周囲のアバターの動きを予測できることは自然な体験の実現に重要である. 一方, 計算コスト削減などの目的でアバターの自由度が低く制限されている場合も多い. このような自由度の低いアバターにおいて, 動作予測のために必要な自由度は何かを明らかにするのが本研究の目的である. 自由度を制限したアバターの動作を予測させる被験者実験を通して, 動作予測に重要な自由度を議論する.

キーワード: 歩行動作予測, アバター, 衝突回避

1. 緒言

近年, VR 技術の進歩によって VR 空間で様々な体験ができるようになってきている. VRchat などでは遠方の人と VR 空間でコミュニケーションが可能となっており, VR の利用はこれからも広がっていくと期待される.

このような VR 環境で, 多人数のアバターが同時に同じ空間内を移動してコミュニケーションを取る状況を考える. このとき, 他のアバターの動作をある程度予測でき, 必要に応じてアバター同士の接触回避が行えることが, より現実的な VR 体験を生むと考えられる. 例えばスクランブル交差点のような環境で, アバター同士がすり抜けるように通行したり, あるいは正面から衝突して足踏みしたりするよりも, お互いが接触しないように回避しながら通行できる方がより現実的である. E. Senft ら [3] は人間同士がすれ違う時にする行動をロボットに再現させることで人間がロボットに好印象を抱くことを明らかにしており, VR 環境においても人間の動作を適切に再現することが体験の質向上に貢献すると見込まれる.

一方で, 計算コストの観点などから, VR 環境内のアバターの動作自由度は低く設定されていることも多い. Minecraft のように複数ブロックの連結で身体が表現されているような単純化されたアバターにおいては, リアルなアバターよりも動作に関連した情報が少なく, その行動予測がしにくいため, 移動に伴う自然なインタラクションが難しくなると考えられる.

本研究では, 身体動作予測の観点から, アバターに付与すべき自由度について検証する. 計測された人の歩行動作を利用し, そこから適切に自由度を低減したアバターを生成する. このような低自由度アバターとリアルな歩行動作との間で, 人が見たときの予測精度を検証した. どのような自由度を採用したときに予測精度が向上するかを検討し,

歩行予測の観点からアバターのどのような自由度を残しておくべきかを議論できる.

本研究では特に, どこまで自由度を下げて良いかを検証するために, まずはシンプルな円柱型のアバターを用意し, 並進と回転の自由度の組み合わせにより構成されたアバターについて, 人が見たときの動作方向の予測精度を比較した. 実験の結果, 胴体の 3 次元運動を提示した場合が, 他の回転などを組み合わせた場合よりも早く予測が可能であることを確認した.

2. 先行研究

S. D. Lynch ら [1] は VR 空間内での衝突回避の実験を行い, 人間同士が VR 空間で衝突回避を行うときの視線の影響が小さいことを明らかにしている. 杉本 寧々ら [2] は kinect や VICON をもちいて, 人間の歩行転換の方向の予測に必要なパラメータを研究し, 最も重要な情報は頭部重心と頭部旋回であると明らかにしている. 一方今回我々は頭部については向いている方向がわからないようにし, 頭部以外の身体情報を実験に使用している. これは, 頭部や手など比較的自由に動かせる部位ではなく, 重心移動など歩行に伴って無意識に現れる身体情報のなかで重要となる情報を探したいためである. 前述の VRchat やマイクラフトでも頭部の旋回はプレイヤーにゆだねられているおり, これらは身体動作とは独立に駆動できてしまう. 本実験では, 頭部や手以外の部位の重要度を調べることを目標としている.

3. 実験

実験では, 人型に近いアバターと, 頭と胴体だけでできた最低限度の自由度を持つアバターを用意し, 比較するとともに, アバターに自由度を足していった, 最も影響が大きい自由度を検証した. 実験では歩くアバターを見た被験

者が正しくアバターのその後の動作を予測できるかを調べた。その後の動作は、左右への方向転換とし、被験者は方向転換の向きを答える。

3.1 実験手法

まず KinectV2 を用いて人の歩行データを 25 点の 3 次元骨格座標として取得する。フレームレートは 28fps である。KinectV2 に向かう方向に 3 歩歩き、その次の足で曲がるデータを計測する。一步の間隔は 0.5 秒、歩幅は 75 cm と固定した。3 歩目の足が着地し、両足の速度差が 0 となったタイミングを基準時刻 (0ms) とした。0ms 以前の区間は直進し、0ms 以後の区間で 45 度左右どちらかに曲がる動きをする。

歩行動作パターンとしては、

- 右足を支持脚として右に曲がるもの
- 右足を支持脚として左に曲がるもの。
- 左足を支持脚として右に曲がるもの
- 左足を支持脚として左に曲がるもの

の 4 種類のデータを 2 セット撮影した。4 歩目に転回することは固定のため、どちらの足で曲がるかに応じて一歩目を変えている。

この 8 個のデータを CG のアバターに変換して被験者に見せる。アバターは 25 点すべての自由度を持った人型のアバターのほかに、自由度を大きく削ったアバターを以下の 4 種類用意した。

- normal : 25 点の座標から、人型のアバターを生成したものの。
- body concrete: 頭と円柱の胴体のみを持ったアバターで人型アバターの胸の座標の XZ の値を円柱の座標として平行移動する (鉛直方向には移動しない)。円柱は細く重心の左右方向の移動が見えやすい。自由度は 2。
- body rotate : 胴体が楕円柱となり、人型アバターの胸の座標の XZ の値のほかに、胴体の Y 軸周りの回転により胸の左右方向の向きを再現する。自由度は 3。
- body up and down : 胴体は円柱で、人型アバターの胸の座標の XYZ の値に従って動く。自由度は 3。円柱は伸縮し、底面は床面上を平行移動する。
- body free move : 胴体は円柱であり、かつ人型アバターの胸の XYZ 座標に加えて、腰から胸にかけての傾き (腰を基準とした XZ 軸周りの回転) を円柱で再現した。自由度は 5。

これら 5 つのアバターについて、被験者は 1.5 秒の動画を視聴後、左右どちらに曲がるか予測する。選択肢は左右の二択で、わからない場合も強制的にどちらかを回答する。動画は Unity で生成し、正面に対して 45 度上から見下ろす形となっている (図 2 の角度)。

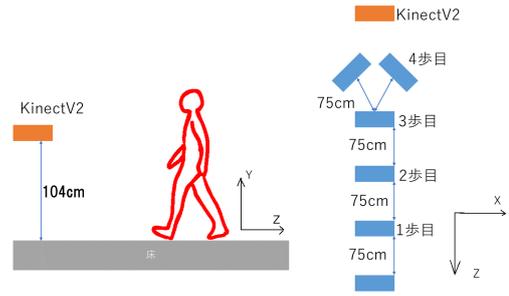


図 1: kinectV2 を用いて人の歩行データを取得する。104cm 歩幅 75 cm で歩き、4 歩目で曲がる。

曲がる直前の両足の速度差が 0 となった時刻を基準時刻として利用した。全ての動画は 1.5 秒であるため、基準時刻の動画は -1.5s ~ 0s の区間となる。比較のために、動画の終了時刻を基準時刻の前後にずらした動画を用意した。すなわち、曲がる兆候のないタイミングまでの動画や、逆に明らかに転回していることが分かる動画がそれぞれ生成される。視聴範囲はフレームを単位として、基準時刻に対して -6, -4, -2, 0, +2, +4, +6, +8, +10 の 9 種類のものとした。基準時刻に対してプラスのものが、基準時刻よりも後のデータまで利用できる条件であり、+10 が最も予測しやすい。28fps で計測したため、2 フレームごとの 71ms 刻みで映像の終時刻は変化している。

被験者が予測できなかった場合、ランダムな回答を行うため、正答率は 50% に収束する。視聴範囲が正方向にずれていき、被験者が予測しやすくなると正答率が 50% を超え、100% に近づいていくと考えられる。実験ではどのタイミングで予測可能になったのかを調べる。見せる動画の数は 8 (試行) × 5 (アバター条件) × 9 (タイミング条件) = 360 個あり、ランダムな順番で提示した。20 代の男性 8 人女性 1 人の計 9 人の被験者に対して実験を行った。

3.2 結果

図 3 は 5 種類のアバターそれぞれについての結果を示す。横軸はその動画がどこまでの情報を利用していったかの時刻を表す。つまり、-210ms が -6 フレーム条件、逆に +350ms が +10 条件である。縦軸は正答率を表す。グラフより、基準時刻よりも遅いフレームの情報を利用するほど転回の方が予測しやすくなる傾向が確認できる。

完全にランダムな回答である 50% と、完全に正解できる 100% の間として、75% を区別できるかどうかの閾値として設定した場合、normal とした人型のアバターでは、-4 フレーム (-143ms) 時点で正答率が 75% を超え、その後も高い正答率で推移することが確認できる。

一方、それ以外の自由度を落としたアバターについては、body free move 条件が -143ms で 80% 近い値となる以外は、基準時刻よりも前の情報のみでは予測が出来ないことが確認された。すなわち、normal に含まれ、それ以外のアバターで削られてしまった自由度の中に、動作の予測において重要な情報が含まれていたことが示された。

75% を基準として考えると、body free move 条件以外の

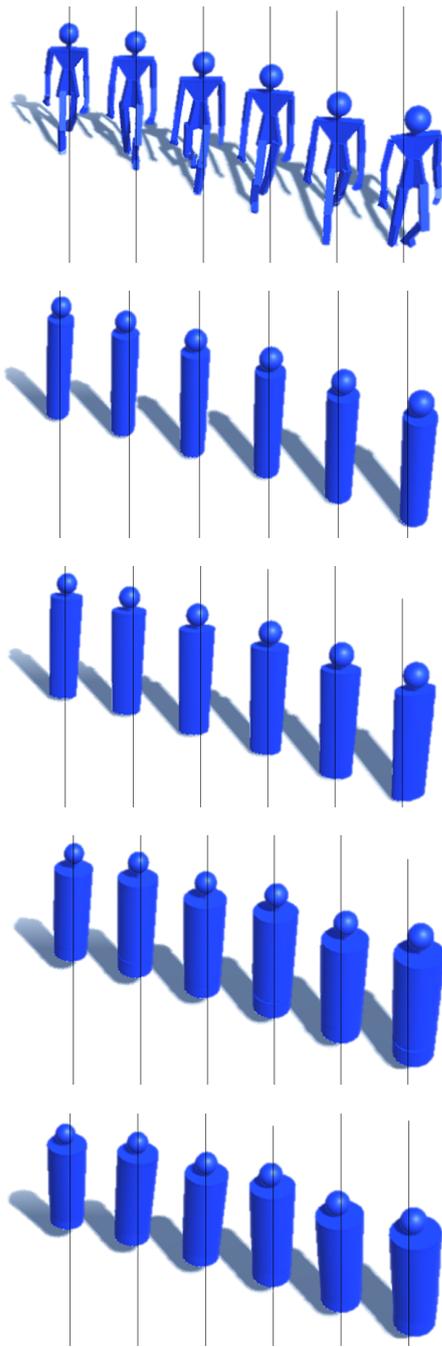


図 2: 5 種類のアバターのうち、上から順に normal, body concrete, body rotate, body up and down, body free move, のアバターを示す。時間軸を右向きにとり、ずらしている。基準時間から+10 フレームの動画を 7 フレームずつコマ送りにしている。

傾向は似通っており、基準時刻に対して+50ms 程度から方向の予測ができることが示唆される。興味深いのは、body free move 条件である。-143ms までは normal 条件と同じような正答率で推移するが、そこから正答率が上がらないという特徴が確認できた。

4. 考察

人型のアバターである normal 条件について、-2 フレーム (-71ms) 時点で正答率が大きく上がったことから被験者

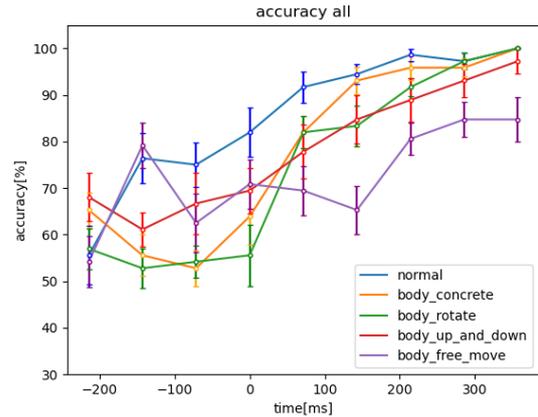


図 3: 5 種類のアバターすべてに対する動画の終了時刻と基準時間とのずれと正答率の関係を表したグラフ。9 名の被験者の平均と標準偏差を表す。

は曲がり始める前の人間の癖を見抜き-71ms 時点で予測ができるようになったといえる。

body concrete とした平行移動する円柱と、body rotate とした体の回転がわかる円柱について、正答率が 50 %程度で推移したのちに、0ms より後に大きく跳ね上がっていることから、どちらに曲がるかを示すヒントとなる動作がこのころに現れたのだと考えられる。両方で共通するのは重心の左右移動のため、時刻 0 付近の重心の左右移動から、曲がる方向を予測できたと思われる。

一方、体の向きという情報が増えているにもかかわらず、body rotate の正答率は、body concrete の正答率と同程度か下回っている。これは、体の向きという情報は曲がる直前においては、重要なヒントとはならず、むしろ重心の左右方向の移動に対する注意を減らす要因となってしまった可能性が考えられる。

このような、追加の情報が予測に悪影響を及ぼす状況は、body up and down とした円柱が重心の移動に従って上下にも移動するものと、body free move とした、人の体の傾きも再現した条件の結果の 0ms 以降にも表れた。特に body free move では、-143ms でのピークを除けば、75%を超えるのが+200ms 程度となっており、他の条件よりも悪化する傾向が見られた。

これについては被験者へのアンケートにおいて、「円柱の傾きが直感的に何を示すのかわからなかった」という意見があったことが関係していると考えられる。すべての動作を実際の人の動作から生成していても、自由度の制約により直感的に人の動きのイメージに結びつかなかった場合、予測結果に悪影響を及ぼすものと考えられる。

body up and down 条件は、基準時刻以降の正答率は body concrete や body rotate 条件と似通っている一方、基準時刻以前についてはそれら条件よりも比較的正答率が高い傾向が見られた。body free move 条件でも、基準時刻以前では同様に予測精度が高いことから、転回直前の頭部の上下動に、その転回方向を予測するのに必要な情報が含まれて

いることを示唆する結果である。このことはこれらの情報がヒントとなるタイミングとヒントとならないタイミングがあることを示している。つまり、情報の重要度は一定ではなく時間によっても変化する可能性がある。

今回の結果より、concrete と rotate に差がなかったことから、アバターの回転が予測に寄与する可能性が低いこと、free move の予測精度が低かったことから、重心の傾き情報もその寄与が低そうなのが示唆された。逆に、予測に寄与する情報として、曲がる直前の頭部の上下動や、曲がる瞬間の重心の左右方向のぶれが重要であると示唆された。ただし、normal 条件に比べて予測精度が低いことから、これ以外の部分、例えばいくつかの関節間の連動性や四肢の動きなどに、方向を推定するのに必要な情報が含まれる可能性がある。このような重要な情報の決定に関しては今後の研究課題である。

5. 結言

VR 空間上での体験の質向上の一つに、アバターの動作が予測しやすいという点を考えた。複数アバターが共存する環境で、他者の動きを予測できるほど、より自然な行動が実現可能となる。一方、アバターが必ずしも全ての身体自由度を有さないことに着目し、予測可能性が高い低自由度アバターを実現するために、どのような情報が予測可能性に強く寄与するか調べる実験を行った。

その結果、重心の左右方向の移動だけでも予測が成り立つ一方、曲がる方向を指し示すヒントとなる予備動作は様々

な箇所に現れるため、今回検証したシンプルなアバターでは自由度を削減しすぎていることが確認された。予測に安定して大きく寄与する情報は、転回前の頭部の上下動、及び転回瞬間の重心の左右方向のぶれであることを示唆する結果を得た。

謝辞

本研究は科研費（基盤 B）21H03479 の支援を受けた。

参考文献

- [1] S. D. Lynch, J. Pettré, J. Bruneau, R. Kulpa, A. Crétual and A. Olivier, "Effect of Virtual Human Gaze Behaviour During an Orthogonal Collision Avoidance Walking Task," 2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR), 2018, pp. 136-142, doi: 10.1109/VR.2018.8446180.
- [2] 杉本 寧々, 小川 愛実, 三田 彰, 重心に着目した歩行中の方向転換動作の予測, 日本建築学会技術報告集, 2022, 28 巻, 68 号, p. 510-514, 公開日 2022/02/20, Online ISSN 1881-8188, Print ISSN 1341-9463, <https://doi.org/10.3130/aijt.28.510>,
- [3] E. Senft, S. Satake and T. Kanda, "Would You Mind Me if I Pass by You? : Socially-Appropriate Behaviour for an Omni-based Social Robot in Narrow Environment," 2020 15th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI), 2020, pp. 539-547.