



足裏接地タイミングでの仮想床沈下が 柔らかさ知覚に与える影響の検証

山下衛紀¹⁾, 酒田信親²⁾

1) 龍谷大学 先端理工学研究科（〒520-2123 滋賀県大津市瀬田大江町 横谷 1-5, y25m038@mail.ryukoku.ac.jp）

2) 龍谷大学 先端理工学研究科（〒520-2123 滋賀県大津市瀬田大江町 横谷 1-5, sakata@rins.ryukoku.ac.jp）

概要 : HMD を装着しながら現実世界のヨガマットの上を歩く際、足がヨガマットに接地したタイミングで仮想空間の床を沈み込ませることで、現実のヨガマットの柔らかさの知覚がどう変化するかを検証した。沈み込みの最大の深さ・沈み込み方が違う 6 種類のパターンと、沈み込みが発生しないパターンを用意し実験を行った。その結果、沈み込みが深いほど柔らかく感じるわずかな傾向があった。

キーワード : クロス・マルチモーダル, 感覚・知覚

1. はじめに

近年、VR（Virtual Reality）技術の普及により、現実世界ではありえない空間の変化を提供する仮想空間を手軽に体感可能になった。また、頭部装着型ディスプレイ（Head Mounted Display, 以下 HMD）による視覚的な仮想空間の変化によって、様々な人の知覚の変化が発生することが知られている。

そこで本研究では、現実とは異なる視覚情報を提示可能な VR の特性を活かし、視覚情報の変化によって知覚や人間の自然な動作にどのような影響を与えるかを調べることで、人間の動作に関する新しい発見が可能ではないかと考えた。自然な動作の一例として、歩行では、足の動きによって頭部の位置が上下するのに合わせて、頭部の角度や眼球の角度を無意識に調節していることが知られている [1]。

2. 関連研究

2.1 VR 空間での視覚刺激が着座時の触感に与える影響

五十嵐らは VR 環境における視点位置を操作することで、現実環境の触感を VR 環境から期待される触感に近づける手法を提案した [2]。この研究で低反発な座面を提示するインタフェースの評価では、着座時に下半身が下に沈むような視点移動を行い、座面の柔らかさを 7 段階評価で回答させた。実験の結果、視点位置の移動が大きいほど、あるいは動きが遅いほど、参加者は椅子を柔らかいと評価した。また、柔軟な背もたれを提示するインタフェースの評価でも、椅子の背もたれへ、もたれかかった際に、視点位置を変位させることで、参加者は柔軟な背もたれを知覚した。

この研究結果は視点移動によって現実環境の触感を変化させるという本研究の実現性を担保する論文となっている。

3. 実験

3.1 仮説

本実験の仮説として、現実世界の床に置いてあるヨガマットを歩いた際の沈み込みを仮想空間で視覚的に強調すると、ヨガマットがより柔らかく感じるのではないかと考えた。また、沈み込みの強調によって歩行時の動きが、柔らかい場所を歩くような動きに変化するとも考えた。本実験では、視覚情報による触覚の変化とその変化が歩行時の動きに及ぼす影響を調査することを目的とした。

3.2 実験方法

実験では図 3.2.1 の様に HMD を装着しながらヨガマットの上を歩き、ヨガマットを踏んだタイミングで仮想空間の床を視覚的に沈み込ませ、その沈み込みに同期して HMD の視点が実世界での沈み込みの変量よりも沈み込む実験設定とした。この仮想空間の視覚上の変化によってヨガマットの柔らかさに対して触覚の変化を感じるかを確かめた。また、全身の動きを計測することで歩行の動きにどのような変化があるのかを調査した。

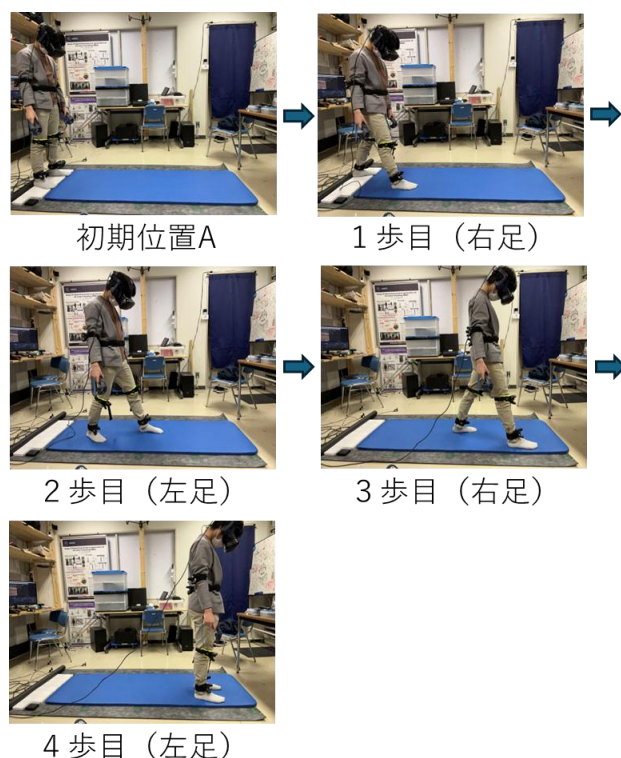


図 3.2.1 : 歩行の様子

3.3 実験環境

仮想空間の作成のため、Unity(2022.3.36f1)を使用した。HMDは、HTC社製 VIVE Pro 2を使用した。全身の動きの記録のために、VIVE Trackerを用意し、腰・右肘・左肘・右膝・左膝・右足首・左足首に図 3.3.1 のように装着した。右手・左手の動きの記録は VIVE コントローラを使用した。頭の動きの計測はトラッキングされている HMD の移動量を使用する。

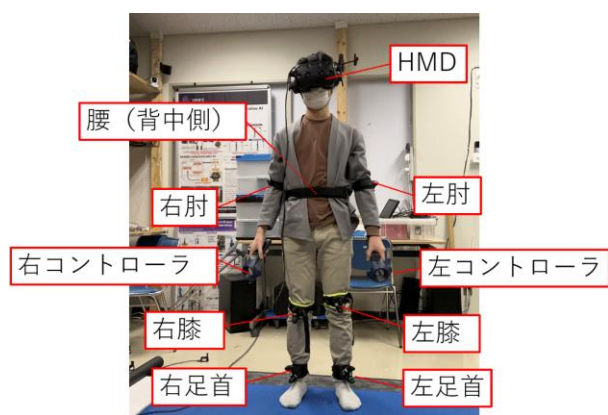


図 3.3.1 : 装着したトラッカ

トラッカを装着して動くうちにトラッカがずれたり、被験者によってトラッカの装着に差があったりするため、トラッカの座標・回転データが個人間で分析し難くなる。そこで、個人間でトラッカのゼロ基準をキャリブレーションする必要がある。歩行開始前の静止状態のトラッカの座標・回転をゼロ基準とするが、歩行開始位置がヨガマットの上であると沈み込みによって Y 座標 (鉛直上向き) の位

置が安定しないため、歩行開始地点にヨガマットと同じ高さの硬い台を設置することで基準位置を安定させた。座標軸は、歩行時の右手側が X 軸、鉛直上向きが Y 軸、進行方向が Z 軸である。

図 3.3.2 のように、仮想空間上に四方で囲むように壁・床の 3D 物体を配置した。床表面に描画した足の目印は歩行時に足を置く位置を指示するものである。右足首・左足首に装着した VIVE Tracker が床面の座標値に近くなったときに、ヨガマットを踏んだと判定する実装とした。

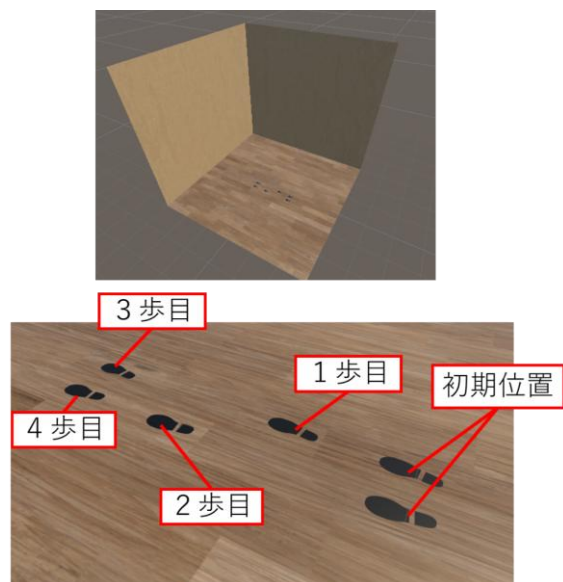


図 3.3.2 : 作成した仮想空間

全身の動きの記録は、HMD・VIVE Tracker・VIVE コントローラの仮想空間における Unity 座標・姿勢を、時間とともに取得した。

仮想空間の沈み込みは図 3.3.4 に示す 6 種類のパターン (沈み込みアニメーション fast, normal, slow の 3 種類・沈み込みの深さ 0.5m, 1.0m の 2 種類の組み合わせ) を用意し、沈み込まないパターンも用意した。沈み込みアニメーションは Blender を使い、60fps で長さ 20 フレームのものを事前に作成した。それぞれ 3 つのキーフレームを打ち、1 つ目のキーフレームはアニメーションの開始 (1 フレーム目)、3 つ目はアニメーションの終了 (20 フレーム目) で、2 つ目のキーフレーム (fast: 5 フレーム目・normal: 10 フレーム目・slow 15 フレーム目) は沈み込みが最大の深さになるタイミングである。キーフレーム間はベジェ曲線で補間されている。60fps はアニメーションのキーフレームを打つときに使用したフレームレートであり、HMD のフレームレートではない。

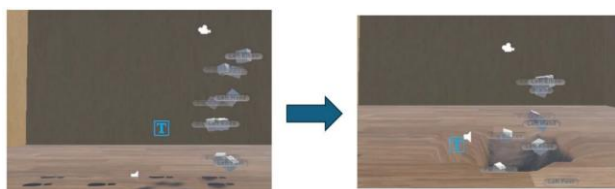


図 3.3.3 : ヨガマットを踏んだときに沈み込む様子

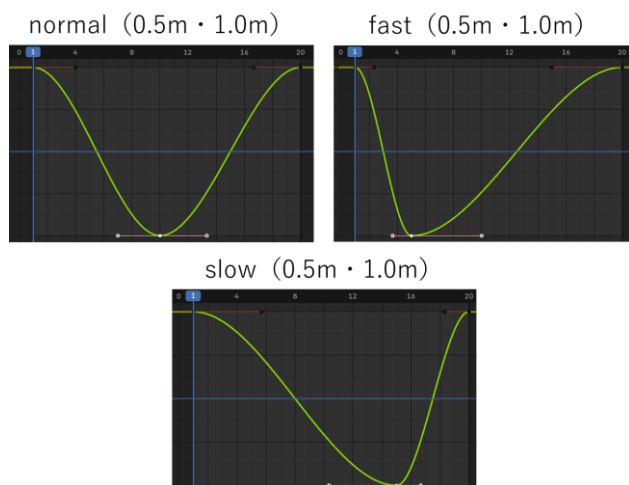


図 3.3.4 : 仮想空間の沈み込みのパターン (60fps 長さ 20 フレーム)

3.4 実験タスク

実験を始める前に、足の目印 (図 3.3.2) に従って歩いてもらい、被験者にとって違和感のない歩幅になるように足の目印の位置を調整した。

調整後、被験者に以下の動作を行わせた (図 3.2.1)。

1. HMD と VIVE Tracker を装着し、両手にコントローラを持ち、足の目印の通りに足を揃える。
2. 足の目印の通りに歩く。

以上の手順を、条件を変更して計 9 回行った (図 3.4.1)。順序効果無くするために 3 つの条件の順番を被験者ごとにランダムに入れ替えた。

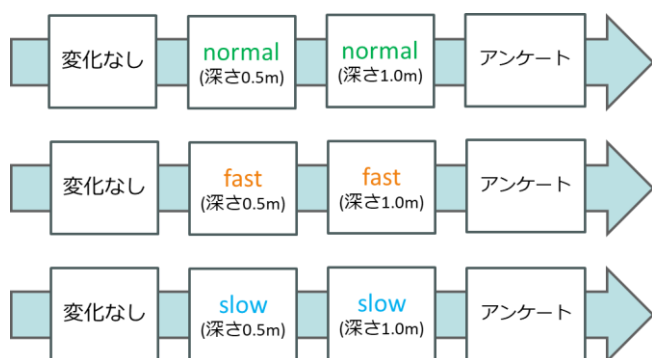


図 3.4.1 : 実験の流れ

3.5 評価方法

ヨガマットを踏んだ際に仮想空間の変化の有無に応じて、ヨガマットの柔らかさ・固さに変化があったかを 5 段階 (固くなった 1 ~ 柔らかくなった 5、変化を感じなかつた場合は 3) でアンケートに回答させた。さらに、HMD・VIVE Tracker・VIVE コントローラの座標・回転(X 座標・Y 座標・Z 座標・ロール・ピッチ・ヨー)の記録を比較し、仮想空間内の変化の有無による歩行の動作に変化が生じたかを確認した。

た場合は 3) でアンケートに回答させた。さらに、HMD・VIVE Tracker・VIVE コントローラの座標・回転(X 座標・Y 座標・Z 座標・ロール・ピッチ・ヨー)の記録を比較し、仮想空間内の変化の有無による歩行の動作に変化が生じたかを確認した。

3.6 実験結果

本実験には 21~24 歳の男性 10 名が参加した。それぞれのアンケート結果を以下に示す。

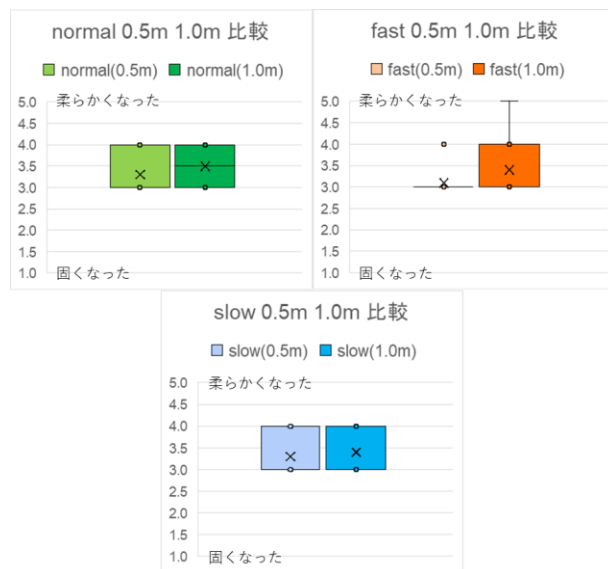


図 3.6.1 : fast, normal, slow 間の比較

(固くなった 1 ~ 柔らかくなった 5、変化を感じなかった場合は 3 の 5 段階評価)

図 3.6.1 のようにすべてにおいて 0.5m よりも 1m の方がより柔らかく感じたというわずかな傾向が見られたが、被験者数が少ないため統計的有意差はみられなかった。

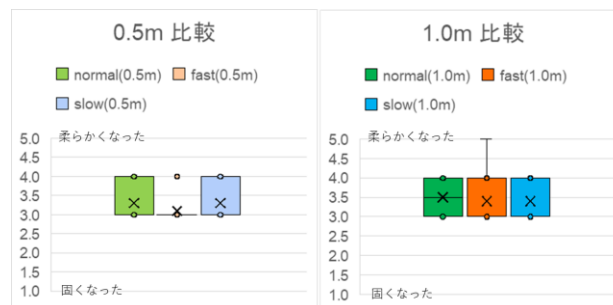


図 3.6.2 : 同じ深さ間での比較

(固くなった 1 ~ 柔らかくなった 5、変化を感じなかった場合は 3 の 5 段階評価)

図 3.6.2 の結果が示すように、柔らかく感じた傾向の強い順は、以下のようになった。

- ・ 0.5m のとき : normal ≒ slow > fast
- ・ 1.0m のとき : normal > fast > slow

よって、深さ 0.5m, 1.0m で柔らかく感じた傾向が一番強いのは normal であった。しかしながら、こちらも、統計的有意差はみられなかった。

3.6.1 全身の動きの測定結果

以下に、条件 fast における特定の被験者の右足の Y 座標グラフを示す（図 3.5.1）。歩行時の変化をグラフの形で比較するため、1 つ目の波（1 歩目の右足を上に上げたときの波）を基準として、以下の図に示す通り 3 つのグラフの時間軸方向で正しくなるようにゼロ点補正をした。縦の点線が位置合わせの基準とした位置である。位置合わせの基準とした場所の選択理由は、仮想空間が変化するのは一歩目の右足でヨガマットを踏んだ時点からであり、それまでは仮想空間の変化が起きておらず、1 つ目の波はすべての条件において共通しているためである。他のすべての座標・回転データの位置合わせの基準は右足の Y 座標グラフの基準と同じにした。

HMD・VIVE コントローラ・VIVE Tracker の座標・回転（X 座標・Y 座標・Z 座標・ロール・ピッチ・ヨー）のグラフを作成し、6 種類の沈み込みパターンそれぞれ、仮想空間に変化がない場合・0.5m 沈むとき・1.0m 沈むときを比較したが差が見られなかった。座標・回転の記録データにはノイズやずれが多く、変化なし・0.5m 沈む・1.0m 沈むグラフの違いは、すべての被験者、すべてのトラッカ、すべての沈み込みパターンでそれぞれ違って一貫性がなかった。

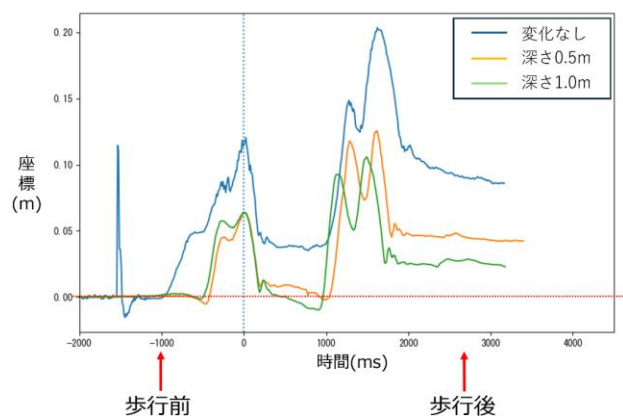


図 3.6.1.1：右足の Y 座標（鉛直上向き）fast 比較

4. 考察

変化あり条件では、ヨガマットに足が設置したタイミングで仮想空間が沈み込むが、一部そのタイミングがずれて

いるように感じるという報告があった。沈み込む深さ 0.5m、1.0m を比較した結果、すべてにおいて 0.5m よりも 1.0m の方が柔らかく感じた傾向はあったが、統計的有意差がなかったのは、上述のタイミングずれが原因となっている可能性が考えられる。沈み込むタイミングの精度を上げることで柔らかく感じた傾向に統計的有意差が生じるのかを検証する必要があると考えている。

座標・回転記録については、ノイズやずれが多く、歩行時の微妙な変化を識別できるほどの精度ではないと考える。その原因として実験環境構築のために VIVE Pro 2 を使用している際、VIVE Tracker が仮想空間上で大きくずれたり、小刻みに震えるような動きをすることが頻発した。この不安定さを解決しない限り、視覚刺激による人間の動作の分析は難しいと考える。このようなずれがあることで、視覚刺激によって人間の自然な動作が変化したとしても 1cm 程度の小さな変化であるとノイズに紛れてしまう。よってこの実験では全身の動きの座標・回転の記録データから得られる知見は少なかった。

5. おわりに

実験結果として統計的有意差は見られなかったが、沈み込む深さ 0.5m と 1.0m の比較より、ヨガマットの柔らかさの知覚の変化が起こる可能性が示された。仮想空間上の沈み込むタイミングの精度を上げ、足をヨガマットに設置したタイミングで確実に沈み込みを発生させるシステムに改良することを今後の課題とする。また、全身の動きの測定については、細かな動作の変化を認識できるよう VIVE Tracker の設定を見直すか、あるいは新たな手法の検討が必要であると考えている。

参考文献

- [1] 平崎鋭矢: “歩行中の視線安定を維持する頭部運動と眼球運動” 大阪大学大学院人間科学研究科紀要, Vol 26, p.177-193, 2000.
- [2] 五十嵐郁瑛, 松室美紀, 柴田史久, 木村朝子: “VR 空間での視覚刺激が着座時の触感に与える影響の分析”, インタラクシオン 2021, pp. 74-82