

VR空間での視点位置変化が着座面の柔らかさ知覚に与える影響

五十嵐郁瑛^{†1} 松室美紀^{†2} 柴田史久^{†1} 木村朝子^{†1}

概要：近年、HMDを用いたVR空間での体験において、擬似触覚（Pseudo-Haptics）と呼ばれる視覚刺激により生じる錯覚を用いて触覚を提示する手法が注目されている。この手法では、デバイスを用いた触覚提示に比べて簡便に触覚を提示することが可能である。既存手法では、特に柔らかさや硬さに関する圧覚を変化させるためには、注視対象の物体の変形の程度を操作した映像が提示されていた。本研究では、視覚情報の制御により観察者が自身の体勢を誤認する現象を利用し、対象の物体を観察しない状況において柔らかさを知覚させる手法を検討した。具体的には椅子の着座に着目し、着座後に現実の身体が停止したのちにも、VR空間においてまるで柔らかい椅子に座ったかのように参加者の視点を下げていく視覚刺激を提示した。この手法を用いて柔らかさの知覚を評価する実験を行った結果、実際に接触対象（椅子）が変形する様子を見せずとも、柔らかさを知覚させられることが明らかになった。また、提示映像における視点位置変化の制御のパラメータとして用いた、視点が最終的に到達する位置と、その位置までに視点が移動する割合の2要因を変化させることで、柔らかさ知覚の強度に差が生じることが示された。

1. はじめに

近年、ヘッドマウントディスプレイ（HMD）を用いたVR空間での体験において、触力覚を提示するインタラクションが盛んに研究されている。触力覚を提示する従来の手段として、例えば接地型の装置に手を置いたり[1]、外骨格型の手袋を装着したり[2]することでユーザの皮膚に力や振動を直接与え、皮膚感覚受容器を刺激する方法がとられている。しかし、このような触力覚提示デバイスを用いる方法では、装置の機構が複雑化したり、装置が大型化したりしてしまい、利便性が低い。

そのため大掛かりな装置を用いずに、錯覚現象を用いてユーザに感覚を提示しようとするアプローチが注目されている。錯覚現象とは人体、特に五感などの感覚器官に異常がないにも関わらず、人間が対象を実際とは異なった知覚・認識をする現象のことである。錯覚現象の中にはミュラー・リヤー錯視のような視覚刺激による錯覚や、ファントムセンセーションのような触覚刺激による錯覚というような単一のモダリティにより生じるものがある。また複数のモダリティからの入力により、実際とは異なる知覚を得るクロスモーダル現象を利用した錯覚も数多く示されている[3]。

本研究は、クロスモーダル現象を活用した感覚提示の代表的な研究の一つであり、Lécuyer[4]によって提案された擬似触覚（Pseudo-Haptics）に着目する。擬似触覚とは、視覚から得た情報により、実際には生じていない触力覚を得たり、実際より強い（弱い）触力覚を得たりする錯覚である。例えば、カーソルが身体の動きを反映していると感じている状態で、カーソルの動く速度を変化させることで、操作

者はカーソルを重く、または、軽く知覚する[4]。これは、視覚から得た情報と、身体の移動や感覚運動系の動きから得た情報の間でズレが生じた際に、視覚による情報を正しい知覚とみなす脳の特性により生じるものである。

擬似触覚では主に、力の変化に加えて、触った物体の触覚的特性である触覚（つるつる／ざらざらとした質感）、力覚（重さ／軽さ）、圧覚（柔らかさ／硬さ）に関する知覚の変化を提示可能である。このうち、圧覚に関する研究では、擬似触覚の提唱時から様々な研究がなされており、仮想のバネの変形による弾性力知覚[5]や、マウスへの押下量やシリコンパッドへの押下量に対する画像の変形による柔らかさ・硬さ知覚[6][7]などがある。

これら既存手法では、注視した対象が変形する映像を提示することで、手で得た押し込み量に対するズレを認識し、柔らかさを知覚させていた。しかし現実世界においては、ソファに座ったり、布団に横になったりする状況など、接触対象を視認せずとも、柔らかさを知覚することが多くある。それらの状況においては、物体が変形する様を見ずとも、生体組織の変形を感じる皮膚感覚と、身体の沈み込みを感じる深部感覚の情報を統合した体性感覚情報の変化によって柔らかさを知覚すると推測されている[8]。この場合では、先行研究において用いられていた柔らかさを提示する手法は利用できない。

そこで本研究では、視覚刺激により参加者の体勢情報に変化を与え、接触対象を視認していない状況での柔らかさの提示を試みる。松本ら[9]は、歩行者に実際の進行方向とは異なる方向の景色を提示することにより、自身の体が向いている方向を錯覚させることに成功している。同様に、本研究では椅子の着座に着目し、沈み込みのある椅子に着座したかのような視界を提示することにより、椅子の柔らかさの知覚を変化させる。

^{†1} 立命館大学大学院 情報理工学研究所

^{†2} 立命館大学 情報理工学部

具体的には、着座後に現実の身体が静止したタイミングでも、さらに視点位置が下がり続ける映像を提示することにより、身体が沈み込んだような錯覚を引き起こし、柔らかさを知覚させることを試みる。視点位置の制御は、視点到達する最終的な地面から見た視点の高さ（以降、本論文では最終視点位置とする）と、フレーム毎の視点位置の下がる割合（以降、本論文では視点移動率とする）を変化させることで行う。本論文では、この最終視点位置と視点移動率を変化することによって、着座した椅子を柔らかく知覚するのかどうか、および柔らかく知覚させるために最適な最終視点位置と視点移動率の設定を検討する。

2章では今回の実験設計と実験結果について述べる。3章では、得られた実験の結果およびその考察を述べる。4章では、本研究を総括し、今後の課題について述べる。

2. 実験設計と実験結果

2.1 実験概要

本実験は、着座後の視点位置を変化させた視覚刺激によって柔らかさを知覚するかの確認を目的として行った。視点位置の変化は、非透過型 HMD 上に表示される映像を、最終視点位置と視点移動率のパラメータを変化させて提示することで行った。そして、その2つの要因を変化させた場合に知覚する柔らかさに差異があるかを調査した。

2.2 実験参加者

本実験には、大学生・大学院生の男性10名が参加した。年齢は21歳から24歳であった。参加者は全員が1回以上のHMD装着経験があった。

2.3 提示刺激

VR空間上で図1のような部屋の映像を提示した。図2の左図の立位から着座までの間は、HMDの動きに合わせて変化する映像を提示した。参加者の着座時の視点位置を1.3mと仮定し、図2の右図のように、視点が地面から1.3mに到達したときに、HMDの映像が別の制御カメラの映像（以降、本論文では制御映像と呼ぶ）に切り替わり、視界の沈み込みが始まる。制御映像の変化は、ゲームエンジンであるUnityに搭載されている線形補間関数に則り、カメラを移動させることで実現した。

t フレーム後の視点位置を $f(t)$ [m]としたとき、 $f(t)$ は以下の(1)式に従って決定された。

$$f(t) = f(t-1)(1-\alpha) + H\alpha \quad (1)$$

式中の H と α は、本実験で変更するパラメータである、最終視点位置 H [m]と、視点移動率 α である。 H が小さければ視点は低くまで沈み込むようになり、 α が小さくなると視点はゆっくり沈むようになる。

α は以下の(2)式によって変化する。

$$\alpha = kd \quad (0 < \alpha < 1) \quad (2)$$

フレーム間隔を d [秒]とし、実験条件ごとに任意定数 k を変化させることで、 α が定まる。なお、本実験ではフレ



図1 提示する映像

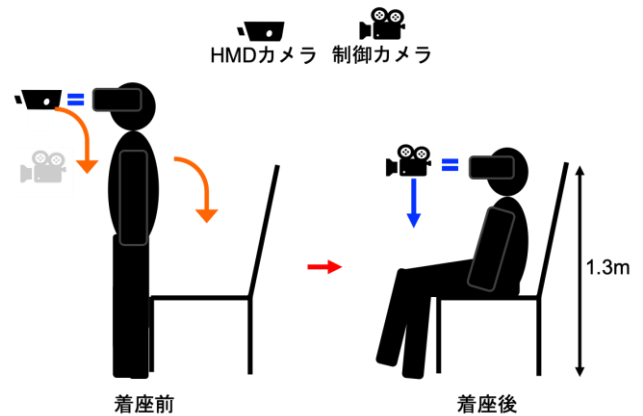


図2 刺激提示開始のタイミング

ーム間隔 d は0.02秒に固定した。また、視界の沈み込みを行わない場合、HMDの映像は制御映像には切り替わらず、その時の視点の位置は地面から1.3mであり、視点が移動しないため、 α が0である状態と同義である。

2.4 実験環境

実験時の環境は図3のとおりである。参加者は、HMD (Oculus Quest) を装着した状態で、4脚の非回転式の椅子に座った。椅子の位置がずれないように、床面の環境に合わせて椅子の脚部の調整を行った。椅子の座面の上には、参加者の臀部への負担軽減のため55×59 [cm]のクッションを置いた。

質問への回答は、付属のコントローラ (Oculus Touch) を使用した。HMDへの映像の出力、および質問の回答画面は、Unityで制作したアプリケーションを、HMD本体で実行して行った。

2.5 実験条件

実験では参加者が着座した際に、提示される映像を2.3で示した線形補間関数 $f(t)$ に従って変化するように設定した。その際、基準の最終視点位置 H を1.3mとし、1.25m、0.95m、0.65mと変化した。また、視点移動率 α に関しては、0.01、0.10、0.20 ($k=0.5, 5.0, 10.0$)と変化した。

2.6 実験指標

椅子に着座したときの柔らかさ、および違和感の大小に関しての質問に対し7段階のリッカート尺度で回答させた。質問内容は以下の通りである。

i. 椅子に座った時にどのような椅子であるように感じましたか？

(1:非常に硬い ~ 7:非常に柔らかい)

ii. 椅子に座った時に違和感がありましたか？

(1:全くない ~ 7:非常にある)

2.7 実験手続き

はじめに参加者に課題や操作方法について説明を行った。その後、参加者に HMD の被り方や、着座および立位の姿勢、課題の流れと質問回答方法をそれぞれ練習させ、実際に HMD を被り 1 試行の流れを確認させた後、試行を開始した。

各試行で、参加者は着座状態からまっすぐ立ち上がり、その後、背もたれに背中をつけないよう、まっすぐに椅子に腰をおろし着座した。提示した映像で視点が最終視点位置へと到達してから 5 秒間、参加者には正面を注視させた。その後、質問回答画面に遷移し、参加者は左手のコントローラの十字キーを用い、各質問に関し 7 段階での評価を行った。

各試行では、ランダムに選択されたパラメータの組み合わせを用い、2.3 の式(1)、(2)に従い、映像を変化させた。

最終視点位置の 3 種類と、視点移動率の 3 種類の組み合わせの 9 試行と、映像の操作を行わない 1 試行の計 10 試行を 1 セットとし、3 セットを繰り返した。よって全試行回数は (9+1) (種類) × 3 (セット) の 30 試行であった。1 セット目の 1 試行目では、参加者全員に共通して何も変化しない映像を提示し、視覚刺激の基準とした。

全条件での評価の終了後、インタビューを実施し、実験を通して得た感想を自由に回答させた。

2.8 結果

図 4 および図 5 は着座後に知覚した柔らかさ、および着座後に得た違和感の回答の結果を示している。赤の破線は映像変化がない場合の参加者の平均評価値を表している。映像提示に変化がない場合は、柔らかさの平均評価値は 3.67、違和感の平均評価値は 2.33 であった。

各評価において、3 (最終視点位置 [m]: 1.25, 0.95, 0.65) × 3 (視点移動率: 0.01, 0.10, 0.20) の分散分析を行った。結果として、知覚した柔らかさ、および着座後に得た違和感において、最終視点位置と視点移動率の交互作用は有意ではなかった (柔らかさ: $F(4,18) = 0.749, p = .561$, 違和感: $F(4,18) = 0.427, p = .789$)。両指標において、最終視点位置の主効果 (柔らかさ: $F(2,18) = 6.248, p < .001$, 違和感: $F(2,18) = 42.464, p < .001$)、および、視点移動率の主効果 (柔らかさ: $F(2,18) = 3.915, p < .01$, 違和感: $F(2,18) = 18.898, p < .001$) が有意であった。

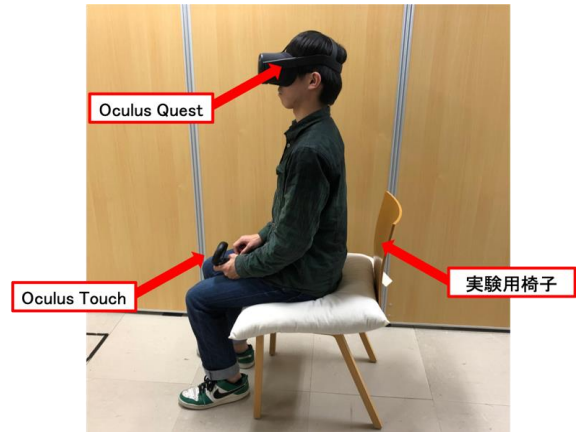


図 3 システム構成

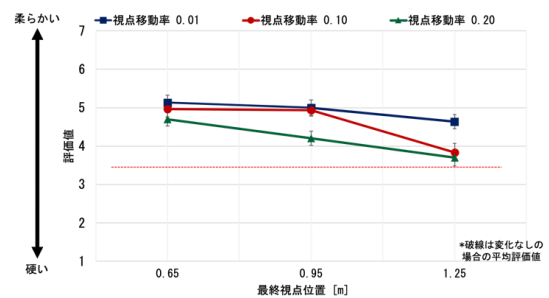


図 4 主観評価の結果 (柔らかさ)

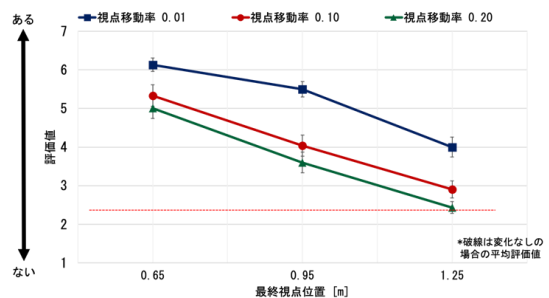


図 5 主観評価の結果 (違和感)

最終視点位置の変化と視点移動率の変化が知覚する柔らかさに与える影響について確認するため、下位検定として Ryan の方法を用いた多重比較を行った。その結果、最終視点位置が 1.25m のとき、他の 2 つの高さより有意に柔らかいと回答された (0.65 m: $p < .001$; 0.95 m: $p < .005$)。一方で、0.95m と 0.65m の組み合わせに有意な差はなかった ($p = .300$)。また、視点移動率に関しては、0.01 と 0.20 の組み合わせで有意差 ($p < .005$) があり、0.10 と 0.20 の組み合わせでその差は有意傾向 ($p = .089$) であった。一方、0.01 と 0.10 の組み合わせでは有意な差はなかった ($p = .120$)。同様に、最終視点位置の変化と視点移動率の変化が着座後に得た違和感に与える影響について確認した。その結果、着座後に得た違和感について、最終視点位置においては、すべての組み合わせにおいて有意差 ($ps < .005$) を確認した。また、視点移動率においては、0.10 と 0.20 の組み合わせ

せ ($p = .121$) を除く全ての組み合わせにおいて、有意差 ($p < .005$) を確認した。

また、自由回答で得られたコメントには、「視点が下がると身体が床にめり込んだような気がした」「身体が落下していくような感覚があった」「椅子に沈み込むよりは椅子ごと沈み込むような感覚があった」「違和感があったが柔らかさを感じた」「最初は柔らかさを感じていたが、後から感じなくなった」「後半につれて椅子の変化を感じやすくなった」などがあった。

3. 考察と今後の課題

3.1 考察

本研究では、着座時の体性感覚情報に影響するであろう最終視点位置と視点移動率の2要因を変化させた視覚刺激を提示することで、椅子の柔らかさの知覚が変化するかを検討した。

図4から、最終視点位置と視点移動率を変化させた場合に、変化させなかった場合に比べて、いくつかの条件を除き柔らかさの評価値が高い傾向にあったことから、今回用いた提示手法によって、柔らかさを知覚させられたと考えられる。これは、物体が実際に変形する様子を提示せずとも、沈み込む椅子に座ったときのような視界を提示することで、擬似的な柔らかさを知覚させることが可能であることを示している。

続いて、最終視点位置および視点移動率が、柔らかさの知覚にどの程度影響するかに関して考察を行う。まず、最終視点位置の変化における知覚する柔らかさ、および違和感について考察する。知覚する柔らかさに関しては、最終視点位置が現実の椅子での視点の位置より大きく下がった場合に、柔らかく知覚する傾向にあった。このことから、視点位置を下げることは柔らかさの知覚を増加させる要因であることが示される。一方で、最終視点位置を大きく下げた2つの組み合わせ ($H = 0.95$ と $H = 0.65$) を比較した際には、有意差が確認できなかったことから、知覚する柔らかさにおいては最終視点位置に閾値があり、閾値を超える視点位置では知覚する柔らかさには差が生じにくいと考えられる。

違和感に着目すると、最終視点位置が低くなるにつれ、違和感が増加し、地面に近いところまで沈み込んだ場合には、視点移動率に関わらず、違和感の平均評価値がどちらとも言えないに当たる4を超えていた。これは、参加者のコメントにも示されるように、最終視点位置を下げすぎると、床に身体がめり込んだような感覚が生じたためであろう。このような違和感から、特定の値以上では、最終視点位置を下げて柔らかさの知覚が増加しなくなったと考えられる。

次に、視点移動率の変化によって知覚する柔らかさ、および違和感について考察する。知覚する柔らかさに関して

は、視点移動率が小さくなればなるほど、柔らかく知覚する傾向にあった。視点移動率が小さければ小さいほど、よりゆっくりと沈み込んでいく視界が提示されており、その場合に、より柔らかさを知覚している。これは、関連研究で、ゆっくりと沈み込むクッション材に座った際に、柔らかいと答える傾向にあった[10]と示されていることから、参加者は視点が沈み込む速度が遅い場合に、座面が沈み込んでいく感覚を想起したのではないかと考えられる。一方で参加者は、視点が速く下がると、柔らかい椅子に座っているというより、体が落ちているように感じている可能性がある。

また、違和感に関しては、視点移動率が小さくなる場合、つまりは視界がゆっくりと沈み込む映像が提示されている場合には、違和感が大きい傾向にある。これは、勢いよく着座したのにも関わらず、着座後に視点がゆっくりと下がっていくために、予想した沈み込む速度とのズレが大きいためであろう。一方で、視点移動率が大きい2つの組み合わせ ($\alpha = 0.10$ と $\alpha = 0.20$) を比較した際には、有意差が確認できなかった。

以上より、最終視点位置および視点移動率が、柔らかさの知覚にどの程度影響するかについては以下のように考察できる。最終視点位置が低い場合には、柔らかく感じる傾向にあるが、閾値より低い最終視点位置の場合には、知覚する柔らかさの強度に差は生じにくく、最終視点位置が低くなるほど違和感が大きいと考えられる。また、視点移動率が小さい場合に柔らかく感じる傾向にあるが、違和感も大きい傾向にあり、視点移動率を大きくするほど硬く感じるが、違和感の大小に差は生じにくいと考えられる。

3.2 今後の課題

インタビューの結果から、「身体が椅子に沈み込む感覚というよりも身体自体が落ちている感覚に近い」というコメントが見られた。本来の現実空間で柔らかい椅子に着座した際には、身体や頭の傾ぎが生じる。しかし本実験ではそのような傾ぎを再現せず、勢いよく腰をまっすぐ下ろして着座させていたため、慣れ親しんだ着座の感覚と異なり、着座した勢いそのまま体が落下していく感覚が想起されてしまったと考えられる。

そのため、今後は現実の着座に近い体験ができるように、身体や頭が傾ぐような感覚を出す工夫を取り入れる必要がある。具体的には、通常の椅子における着座時の体の動きと同様の動作で着座の実験ができるように、着座する勢いを抑えつつ、着座に伴う頭の回転や、背もたれに背をつける動きを取り入れた視界の沈み込みの実現を行い、違和感の減少を図る。

また今回の実験で、違和感の評価値が4以下を下回り、かつ柔らかさの評価値が4以上であった要因の水準の組み合わせは2つ（最終視線位置：1.25m のとき視線移動率：0.01；最終視線位置：0.95m のとき視線移動率：0.20）であ

った。そこで今後は、この2つの値の近辺に焦点を当て、変更する最終視点位置と視点移動率の水準をより細かく設定して実験を行い、違和感を得ずに柔らかさを感じることで最適な数値の組み合わせを検討する。そしてより自然な柔らかさの提示を目指す。

4. むすび

本研究では、VR空間での着座時に、着座後に視点がさらに下がり続ける映像を提示することで身体が沈み込んだように錯覚させ、実際に椅子の座面が変形する様子を見せずに柔らかさを知覚させられるかどうかを検討した。

最終的に到達する視点の高さと、その高さまでの視点の移動する割合を変更して実験を行った結果、着座した椅子を柔らかく感じる傾向にあることがわかり、各要因ともその強度に大きく影響を与えることが示された。

今後は、変更する最終視点位置と視点移動率の水準をより細かく設定し、現実に近い着座体験ができ、柔らかさを違和感なく知覚できる範囲を検証する。

参考文献

- [1] 3DSYSTEMS Inc., PHANTOM
<https://ja.3dsystems.com/haptics-devices/3d-systems-phantom-premium>, (参照 2019-12-17)
- [2] Choi, I., et al. Gravity: A Wearable Haptic Interface for Simulating Weight and Grasping in Virtual Reality; In Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology. 2017, p.119-130
- [3] 北川智利：多感覚錯覚からみる身体のリアリティ；日本バーチャルリアリティ学会誌。2005, Vol.10, No.1, p.26-31
- [4] A. Lecuyer, et al.. Pseudo-haptic feedback: Can Isometric Input Devices Simulate Force Feedback?; Proc. IEEE Virtual Real. 2000
- [5] A. Lecuyer. Simulating haptic feedback using vision: A survey of research and applications of pseudo- haptic feedback; Presence: Teleoperators and Virtual Environments, MIT Press. 2009, Vol. 8, No. 1, p. 39-53
- [6] F. Argelaguet, et al.. Elastic images: Perceiving local elasticity of images through a novel pseudo-haptic deformation effect; ACM Transactions on Applied Perception (TAP). 2013, Vol.10, No.3, p.17
- [7] L. Moody, et al.. Beyond the visuals: tactile augmentation and sensory enhancement in an arthroscopy simulator; Virtual Reality. 2009, Vol.13, No.1, p.59-68
- [8] 藤巻吾朗：ソファクッションの硬さが人体に与える影響；岐阜県生活技術研究所研究報告。2010, No.13, p.1-8
- [9] K. Matsumoto, et al.. Unlimited corridor: redirected walking techniques using visuo haptic interaction; SIGGRAPH '16 ACM SIGGRAPH 2016 Emerging Technologies. 2016, p.20
- [10] 滝本 成人, 堀越 哲美, 弓立 順子：心理評価と弾性特性を用いたクッション材の座り心地評価に関する指標化の試み；人間と生活環境。2010, Vol.19, No.2, p.145-152