

# 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

五十嵐郁瑛<sup>†1</sup> 松室美紀<sup>†2</sup> 柴田史久<sup>†1,2</sup> 木村朝子<sup>†1,2</sup>

**概要**：VR 環境で柔らかいソファに座る場合、利用者は柔らかい触感を期待する。しかし、現実環境で椅子が硬い場合には、その硬さを感じてしまい、VR 環境での臨場感が低下してしまう。そこで本研究では、VR 環境における視点位置であるカメラ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。本研究では 2 つのインタフェースを開発した。1 つは座面を低反発なものに知覚させるインタフェースである。参加者に上半身が下に沈むような視点移動を与えることで、椅子の硬い座面が柔らかい座面になったように知覚させられることを確認した。もう 1 つは、背もたれを柔軟性の高いものに知覚させるインタフェースである。上半身を後傾させたような視点動作をさせることで、固定された背もたれが柔軟になったように知覚させられることを確認した。以上から、視覚情報から自己の身体の姿勢情報を上書きすることで、特別な装置を使わなくても、触感が変化する体験を提供可能であることが確認される。

## 1. はじめに

VR 環境における体験では、視覚情報や聴覚情報、触覚情報などの情報提示を駆使して、VR 環境に利用者自身があたかも本当にいるかのような感覚（臨場感）を提示することが重要である。VR 環境から期待される触感と実際の触感が一致していれば、VR 環境の中にいるという臨場感が高まる[1]。一方で、触覚情報に著しい差異が生じれば、体験の質は大きく下がる。例えば、VR 環境で仮想のスイートルームを用意し、そこに置かれている柔らかいソファに座る状況を想定するとする。ここで身体が現実の環境に存在する硬い椅子からのフィードバックを知覚するならば、すぐにスイートルームは現実のものではないことに気付き、臨場感は低下するであろう。臨場感を高めるためには、現実環境からの触覚フィードバックと期待される触感との乖離を埋める必要がある。

VR 環境を変更することは容易であるが、現実環境を即座に変更することは難しい。そこで我々は、VR 環境の変化により触感の乖離が生じやすい、椅子やソファ、ベッドなどの、利用者が身体を置く家具をアプローチの対象とし、それら家具の触感を変化させることにした。このような家具からの触覚フィードバックは、利用者が自分の今いる部屋が高級であるのか、簡素であるのか等の判断材料として使用されやすい。そのため、これら家具を利用する際に、家具の触感が変化すれば、現実環境を大きく変更せずとも、自身がいる環境が変化すると利用者に錯覚させられる可能性がある。

本研究の先行研究との大きな差異は、現実存在する家具の触感が変化すると知覚させることである。触覚フィー

ドバックを提示する多くの既存研究では、デバイスを開発し、仮想物体の触感を提示することを試みていた。これは現実の触感を変更するのではなく、無（則ち実物がない状態）からの触覚フィードバックを生み出そうとしている[2, 3]。これらの既存手法では、現実の家具の触感が VR 環境にあわせて変化すると知覚させることは難しい。

さらに既存研究では手や把持型デバイスに対して多くの手法が提案されてきた[2, 3, 4]。これは手（または指）が敏感な身体部位の 1 つであり、主に物体を扱うことができるためである。しかし、椅子、ソファ、ベッドから得られる触覚フィードバックに関しては、手に与えられる感覚は重要ではない。というのも、我々は家具を利用するとき、家具特有の特徴を身体の動きで知覚できるためである。例えば体が跳ねれば反発力の強いバネを感じ、体が沈めば低反発のクッションを感じ、体が動かなければ硬い表面を感じる。しかし、先行研究で示されるような装置で、このような身体の動きと結びついた触覚情報の提示を考えた場合、装置は大掛かりで複雑なものになってしまう。

そこで、我々はデバイスを用いて新たな触感を提示するのではなく、視覚刺激によって体勢情報を誤認させ、それら家具の特徴を知覚させる手法を提案する。具体的には、家具の特徴を知覚している際に目に映る景色（視点の動き）を再現して提示することで、身体が現実とは異なる動きをしているように錯覚させる。

今回、我々は家具の中でも特に椅子に着目した。椅子は座面や背もたれ、足置きなど多くの部位に分かれ、部位ごとに得られる触感が異なる。加えて椅子の種類に応じて、座った際に様々な姿勢の変化が生じる。例えば、高級感のある柔らかいソファに座る場合と、安価な金属製の椅子に座る場合とでは、体の動きや姿勢が異なり、それに対応して視点の軌跡や最終的な位置も異なる。そこで本研究では逆に視点を操作し、利用者にあたかも現実とは異なる椅子

<sup>†1</sup> 立命館大学大学院 情報理工学研究科

<sup>†2</sup> 立命館大学 情報理工学部



低反発な座面を提示するインタフェース

柔軟な背もたれを提示するインタフェース

図1 開発したインタフェースのイメージ

を利用しているような感覚を生起させることを試みる。

本稿の構成は、2章で錯覚を用いた知覚の変化に関する関連研究および、本研究の位置づけについて述べる。3章で本研究の実験で用いる低反発な座面と柔軟な背もたれを表現するインタフェースの実装について述べる。次に4章では、低反発な座面を表現するインタフェースを用いた実験と評価について述べる。5章では、柔軟な背もたれを表現するインタフェースを用いた実験と評価について述べる。6章では実験の結果から本提案手法に関する考察を行う。そして最後に7章で本研究を総括し、今後の課題について述べる。

## 2. 関連研究

本手法は、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1つであり、Lécuyer[5]によって提案された擬似触覚 (Pseudo-Haptics) に着想を得た。VR環境の中で、表示された手や物体の動きを観察することで、利用者は様々なレベルの硬さ、柔らかさ、重さなどを感じることができる。例えば、二次元ディスプレイ内の仮想のバネが参加者の力に応じてどの程度収縮するかを操作した結果、参加者は表示されたバネの変形に応じて異なる弾性力を知覚する[6]。また、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・硬さ知覚に関する研究もある[7][8]。Banら[9]やBergströmら[10]も、仮想空間内の利用者の手の位置を制御して物体の大きさや形状の知覚を操作している。

しかし家具の触感の変化を知覚させる我々の手法において、これらの方法を適用することは難しい。これらの研究では、疑似触覚を得るために、仮想の手や操作対象を観察する必要があるのに対し、椅子に座ったりベッドに横たわったりしたときには、身体と対象の接触点を見ることができないためである。この問題を解決するため、我々はい

くつかの研究に着目した。自己運動感覚 (ベクション) の研究では、自分が動いていなくとも、周囲の動きによって移動したように錯覚させている[11, 12]。また、Matsumotoらは「無限回廊 (Unlimited Corridor)」を提案した[13]。「無限回廊」では、現実の環境では曲がった道を歩いている時、HMD上に直進して歩いている時の景色の映像を提示することによって、身体の向きの情報を上書きし、自身が直進して歩いていると錯覚させている。これらの研究から、身体や操作対象物を観察することなく、自身の体勢情報を上書きすることが可能であると考えられる。しかしこれらの研究では、触覚に関する検討は行われていない。1章で述べたように、家具の触感を知覚する上で、身体の動きは重要な情報である。そこで、視覚情報を用いて体勢情報を上書きできれば、家具の触感を変化させることが可能であると考えられる。

## 3. 提案手法

我々の手法は、VR環境の中で利用者が椅子に座ったり、ベッドに横たわったりする時の利用者の身体の動きを予測することから始まる。例えば、柔らかいベッドに横たわると体は沈み、柔軟性のある背もたれにもたれかかると上半身は後傾し、反発力の強いクッションの上でジャンプすると体は跳ねる。これらの動きを予測した後に、利用者がVR環境内の家具に身を置いた際に、利用者がどこからどのような方向にVR環境を観察するかを推定し、予測した動きを元にフレーム毎に利用者の目にあたるVR環境のカメラの位置と向きを制御する。

本手法の効果を評価するために、今回は椅子から受ける触覚フィードバックに着目し2つのインタフェースを開発した。第一に座面を柔らかい低反発シートに変化させるもの、第二に背面を柔軟性のある背もたれに変化させるものである。どちらのインタフェースにおいても、VR環境は

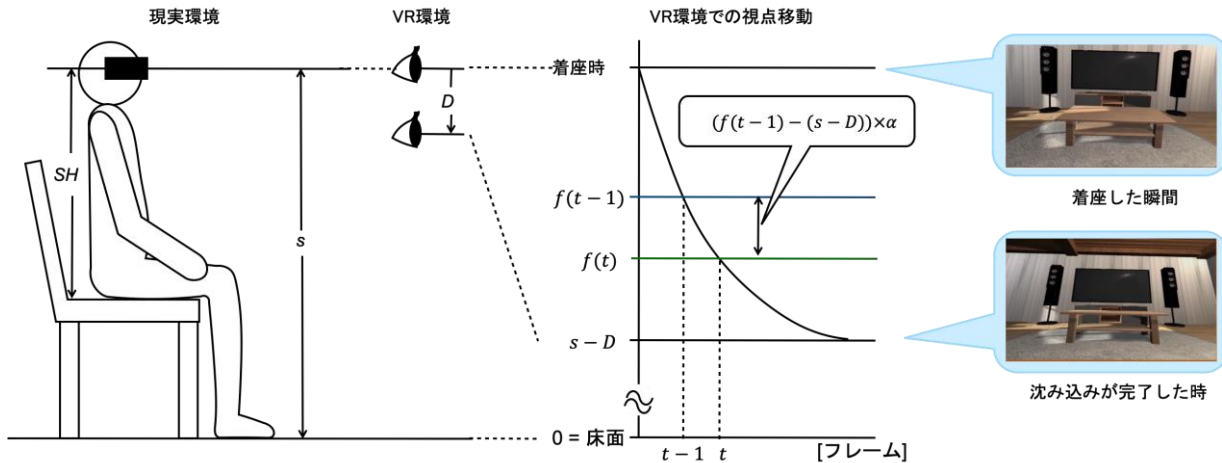


図2 座面実験における視点制御

ゲームエンジンの Unity で構築し、各インタフェースで制御したカメラから見える景色の映像は、HMD を通じて利用者に提供された。

### 3.1 低反発な座面を提示するインタフェース

我々は現実環境で様々な椅子やソファに着座した体験を踏まえ、低反発な座面に座るときの重要な特徴が、身体の沈み込みであることを確認した。現実環境において、臀部が座面に接触すると身体は経過時間に伴い異なる速度で沈み込む。具体的には沈み込み開始時は速く、沈み込み終了時が近づくにつれて遅くなる。そして、その時の視点位置にも同様の沈み込みが生じる。

この知見を踏まえ、利用者の臀部が座面に接触してから VR のカメラ位置に制御を加えることにした。そして、我々はプロトタイプのインタフェースを作成した[14]。プロトタイプでは、図2のように移動量を決定した。立位の状態から、椅子に座った直後を接触時と定義し、この位置を開始地点  $s$  とする。沈み込みの深さを  $D$  としたとき、接触時から  $t$  フレーム経過後のカメラ位置である  $f(t)$  は、(1)式を用いて算出される。この式は、カメラは1フレームごとに残りの沈み込み量（すなわち、1つ前のフレームのカメラ位置  $f(t-1)$  から沈み込み終了時の地面からのカメラ位置  $(s-D)$  までの距離）に対して一定の割合  $\alpha$  だけ下方に移動することを示す。

$$f(t) = f(t-1) - \alpha \times (f(t-1) - (s-D)) \quad (1)$$

このプロトタイプでの体験を行い、本手法を用いることにより、体験者が座面を柔らかいと感じる傾向にあることを確認した。しかしながら、柔らかいと感じるときは違和感も大きいことが判明した。体験者からのコメントでは、垂直落下感による不快感を述べたものが最多であった。そこで、プロトタイプに改良を加えた。

利用者は着座時に、足が床についたままで、座面が膝と同じ高さにあると仮定する。その場合、膝の位置は常に一

定であるため、利用者の上半身は沈み込むとともに後傾する。そこで、改良版ではこの後傾の変化を、プロトタイプの垂直方向の変化に加えることで、垂直落下感を低下させ、違和感をなくすことを試みた。後傾は、臀部を中心とした背中の方に視点を回転することと、後方へ移動することにより表現される。沈み込みに伴う視点位置の回転量  $\text{sink}\theta$  は、 $TL$  (Thigh Length) を利用者の膝上の長さとし、上半身と大腿部が  $90^\circ$  を保っていると仮定して、次式で決定される。

$$\text{sink}\theta = \arcsin\left(\frac{D}{TL}\right) \times \frac{1}{2} \quad (2)$$

また、視点の後方への移動量  $L$  は、 $SH$  (Sitting Height) を利用者の座高としたとき、次式で決定される。

$$L = SH \times \sin(\text{sink}\theta) \quad (3)$$

以上をまとめると、利用者の臀部が座面に接触した後、VR 環境内のカメラ位置は利用者の身体が後傾しながら座面に沈み込んでいるかのように、上記の式(1)(2)(3)に従って自動的に変位する。

### 3.2 柔軟な背もたれを提示するインタフェース

我々が開発したもう1つのインタフェースは、もたれかかると後方に傾く柔軟な背もたれの感覚を提示するものであった(図3)。その傾きの度合い  $\theta$  は、式(4)に示すように利用者が背もたれをどれだけ強く押したかに依存した一次関数として表現された。

$$\theta = P \times \text{fob} \quad (4)$$

ここで、 $\text{fob}$  (flexibility of backrest) は背もたれの柔軟性を示すパラメータであり、一定の力に対する角度で与えられる。この値は現実の背もたれにかけた力に対して仮想の背もたれがどれだけ簡単に後傾するかを意味し、 $\text{fob}$  の値が大きいほど、VR 環境の背もたれは小さな力で大きく後傾する。

この  $\theta$  を VR 環境における利用者の上半身と大腿部との

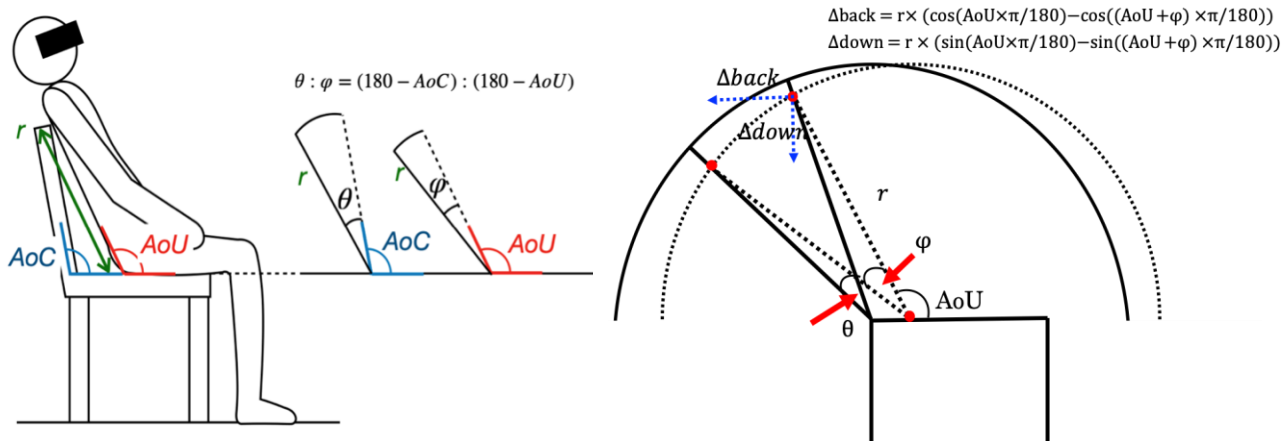


図3 背もたれ実験における視点制御

角度 ( $\varphi$ ) に変換するためには、複雑な計算が必要であり、各フレームで計算をその都度行うことが困難であった。そのため、以下の近似値を用いた。

$$\varphi = \theta \times \left( \frac{180 - \text{AoU}}{180 - \text{AoC}} \right) \quad (5)$$

ここで、各フレームの  $\varphi$  と  $\theta$  の比は、常に現実環境における背もたれと椅子の座面のなす角 (AoC; Angle of Chair) の補助角度に対する利用者の上半身と大腿部のなす角 (AoU; Angle of User) の補助角度との比となる。この近似を利用すると仮定の背もたれが床に平行になったときに、カメラと仮定の座面の接触点を結ぶ直線も床に平行になる。

また、 $\varphi$  を用い、カメラが初期位置から後方 ( $\Delta\text{back}$ )、下方 ( $\Delta\text{down}$ ) にどの程度移動するかを計算した。

$$\Delta\text{back} = r \times \left( \cos\left(\frac{\text{AoU} \times \pi}{180}\right) - \cos\left(\frac{(\text{AoU} + \varphi) \times \pi}{180}\right) \right) \quad (6)$$

$$\Delta\text{down} = r \times \left( \sin\left(\frac{\text{AoU} \times \pi}{180}\right) - \sin\left(\frac{(\text{AoU} + \varphi) \times \pi}{180}\right) \right) \quad (7)$$

式(6), (7)において、 $r$  は、使用者の臀部が座面に接触した点から背中と背もたれの接触点までの長さ (すなわち、回転半径) である。より正確には、使用者の臀部と座面の接触点から HMD までの長さを用いる必要があったが、簡略化のためにここでは  $r$  を用いた。これは寄りかかったときの首の角度が利用者ごとに異なるためである。カメラは、初期位置から後方に  $\Delta\text{back}$ 、下方に  $\Delta\text{down}$  移動した座標に位置する。実際の環境では背もたれが傾くことはないため、初期位置は HMD から取得される実際の位置と同じである。

利用者が背もたれをどれだけ強く押したかを取得するために、椅子の上部に圧力センサを取り付けた。そのデータを Arduino から VR 環境を制御する PC に送信し、映像を HMD に送信した。取得した数値をもとに、利用者の臀部と椅子の接点を中心に頭が回転するように、VR 環境におけるカメラの位置を上記の式に従って調整した。

## 4. 低反発な座面を提示するインタフェースの評価

参加者は自分が座った椅子の座面の柔らかさを評価した。式(1)の  $\alpha$  と  $D$  には3つの値を用意し、9種類の仮定の椅子の座面を設定した。

### 4.1 実験方法

#### 4.1.1 参加者

低反発な座面を提示するインタフェースの実験 (以下、座面実験と呼称する) には、男性の学部生・大学院生計13名 (平均年齢21.769歳、標準偏差(SD) = 0.697) が参加した。

#### 4.1.2 実験装置

前述の通り、参加者に映像を提供するためにビデオスルー型 HMD (Oculus Quest) を使用した。図4に示す VR 環境は Unity 2019.4.5f1 で構築し、カメラ位置 (環境内での目の位置) の動きを認識しやすいように家具を配置した。

実際の環境では、参加者の安全のために固定された背もたれのあるピアノ椅子を使用した (図5)。参加者の臀部への負担を考慮して、椅子の座面には薄いクッションを敷いた。実験前に何人かの参加者に聞き取り調査を行い、クッションの柔らかさ評価に対する効果は非常に小さいことを確認している。座面の位置は、各参加者の膝の位置とした。

#### 4.1.3 パラメータの設定

式(1)における  $D$  値は 0.05, 0.20, 0.35m の3種類を使用した。  $D$  が 0.05 より小さい場合、カメラ位置の変化を認識することが困難であった。また、身長が170cmの膝上の長さは約0.4mであることから、それを超えない値を最大値として設定した。

さらに、式(1)における  $\alpha$  値は 0.018, 0.025, 0.12 の3種類を用いた。0.12 よりも大きな値は、使用者が落下したように感じる場合や、ひどい酔いを引き起こす場合もあるた





図4 VR環境の正面に提示される景色



図5 使用したピアノの椅子

め、適切ではないと判断した。D が 0.05,  $\alpha$  が 0.12 の組み合わせでの視点位置変化のグラフを基準の形状とし、D 値が 0.20 または 0.35 になるまで、その形状を維持したまま拡大して他の 2 つの値を決定した。また、評価のベースラインを取得するために、カメラ位置に操作を加えない無操作条件を用意した。

D を 3 値 (0.05, 0.20, 0.35) と  $\alpha$  を 3 値 (0.018, 0.025, 0.12) 組み合わせた 9 条件と、無操作を加えた 10 条件を実施した。

#### 4.1.4 指標

各条件での体験後、参加者に以下の 2 つの質問を順に行った。1 つは、座面の柔らかさについてであった。「椅子に座ったときのどのような椅子であるように感じましたか？」との質問に対し、1 (非常に硬い) から 7 (非常に柔らかい) までの 7 段階評価で回答を選択させた。もう 1 つの質問は、不快感 (座り心地の悪さ) についての質問であった。「椅子に座った時に違和感がありましたか？」との質問に対し、1 (全く無い) から 7 (非常にある) までの 7 段階評価で回答を選択させた。

#### 4.1.5 手順

参加者は実験について簡単な説明を受けた後、インフォームドコンセントに署名した。その後、課題の詳細を説明し、椅子に座る方法について十分な練習時間を与えた。参加者が指示通りに椅子に座ることができるようになった状態で、評価を開始した。

実験は 3 つのブロックで構成され、各ブロックには 10 回の試行が含まれている。各ブロックの 10 条件の順番は、

参加者ごとにランダムに決定した。各ブロックの開始時には基本姿勢、すなわち背筋を真っすぐ伸ばして椅子に座っている状態をとらせ、VR 環境に置かれたテレビが参加者の正面になるようにカメラの位置と向きを調整した (図 4)。

1 試行の流れは以下の通りであった。試行は参加者が背筋を伸ばして椅子に座った状態から開始した。このタイミングで、式(1), (2) (3)の開始地点  $s$  となるカメラ位置 (床からの高さ) を取得した。実験者の合図で被験者は立ち上がり、椅子に着座した。

座る際には、①背もたれに寄りかからない、②前傾姿勢や後傾姿勢にならない、③背筋をまっすぐに保つ、の 3 点を遵守させた。着座後、参加者は実験者の許可が出るまで基本姿勢を維持した。

視点制御が終わり、カメラの動きが静止してからしばらくすると、HMD がブラックアウトし、柔らかさに関する質問が参加者の眼前に表示された。参加者は質問に口頭で回答した。続いて違和感に関する質問が表示され、同様に参加者はその質問に口頭で回答した。この手順を 1 ブロックあたり 10 回繰り返し、3 ブロックを実施した。ブロックの間では参加者に十分な休息を与えた。

## 4.2 実験結果

各条件における柔らかさの平均得点を図 6、違和感の平均得点を図 7 に示す。赤線は無操作条件 (ベースライン) での得点である。3 ( $D : 0.05, 0.20, 0.35$ )  $\times$  3 ( $\alpha : 0.018, 0.025, 0.12$ ) の被験者内分散分析 (ANOVA) を行ったところ、D 値と  $\alpha$  値の間の交互作用は有意ではなかった ( $F(4, 48) = 1.571, n.s.$ )。また、D 値 ( $F(2, 24) = 25.171, p < 0.001$ ) と  $\alpha$  値 ( $F(2, 24) = 20.400, p < 0.001$ ) の両方の主効果が有意であった。

主効果が有意であった場合 (すなわち、 $p < 0.05$ ) に各条件のペアを比較するために、ライアン (Ryan) の多重比較検定を用いた。D 値については、D 値が 0.20 と 0.35 の場合、0.05 の場合に比べて有意に柔らかく評価された (0.20 vs. 0.05 :  $t(24) = 5.156, p < 0.001$ , 0.35 vs. 0.05 :  $t(24) = 6.799, p < 0.001$ )。D 値が 0.20 と 0.35 の時の柔らかさに有意な差はなかった ( $t(24) = 1.643, n.s.$ )。  $\alpha$  については  $\alpha$  値が 0.018 と 0.025 の時に比べて、 $\alpha$  値が 0.12 の時に参加者は有意に硬く感じていた (0.018 vs. 0.12 :  $t(24) = 5.792, p < 0.001$ ; 0.025 vs. 0.12 :  $t(24) = 5.229, p < 0.001$ )。  $\alpha$  値が 0.018 の場合と 0.025 の場合では、柔らかさに有意な差はなかった ( $t(24) = 0.563, n.s.$ )。以上の結果から、カメラ位置の移動量が大きい (D 値が大きい) ほど座面が柔らかく感じられたことが示される。また、 $\alpha$  値は D 値とは独立して柔らかさに影響を与えた。  $\alpha$  値が最も大きいとき、1 フレーム内の移動量が最も多いとき、柔らかさを感じにくくなることが判明した。この結果から、柔らかいと利用者に感じさせるためには、フレーム内の移動量が少ないこと、つまり移動速度が遅い必要があることが示唆された。

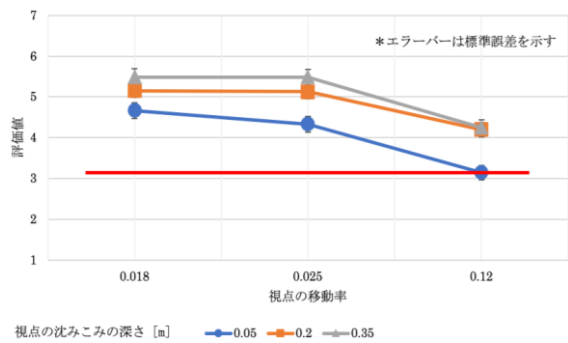


図6 柔らかさの評価

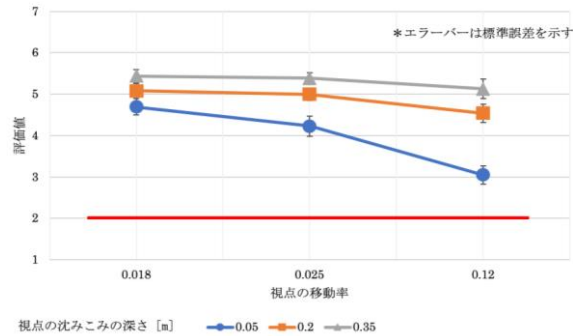


図7 違和感の評価

違和感の得点に関して、 $3 (D: 0.05, 0.20, 0.35) \times 3 (\alpha: 0.018, 0.025, 0.12)$  の被験者間 ANOVA を行った結果、 $D$  値と $\alpha$  値の間の交互作用が有意であった ( $F(4, 48) = 4.342, p < 0.005$ )。また $D$  値 ( $F(2, 24) = 24.240, p < 0.001$ ) と $\alpha$  値 ( $F(2, 24) = 4.839, p < 0.05$ ) の両方の主効果が有意であった。

交互作用における単純主効果の分析を行った。その結果、全ての $\alpha$  値において $D$  値の単純主効果が有意であった ( $\alpha = 0.018: F(2, 72) = 3.536; p < 0.05, \alpha = 0.025: F(2, 72) = 8.825, p < 0.001; \alpha = 0.12: F(2, 72) = 29.287, p < 0.001$ )。 $\alpha$  値が 0.018 のとき、 $D$  値が 0.05 に設定された時より、0.35 に設定された時の方が、有意に違和感があると評価された ( $t(72) = 2.659, p < 0.001$ )。その他の対の評価値の差異は有意ではなかった (0.05 vs. 0.20:  $t(72) = 1.375, p > 0.05; 0.20$  vs. 0.35:  $t(72) = 1.283, n.s.$ )。 $\alpha$  値が 0.025 のとき、 $D$  値が 0.05 に設定された時より、0.20 および 0.35 に設定された時の方が、有意に違和感があると評価された (0.05 vs. 0.20:  $t(72) = 4.125, p < 0.01; 0.05$  vs. 0.35:  $t(72) = 2.750, p < 0.001$ )。 $D$  値が 0.20 と 0.35 の組み合わせの評価値の差異は有意ではなかった ( $t(72) = 1.375, n.s.$ )。 $\alpha$  値が 0.12 のとき、 $D$  値が 0.05 に設定された時より、0.20 および 0.35 に設定された時の方が、有意に違和感があると評価された (0.05 vs. 0.20:  $t(72) = 5.317, p < 0.001; 0.05$  vs. 0.35:  $t(72) = 7.426, p < 0.001$ )。また $D$  値が 0.20 に設定された時より、0.35 に設定された時の方が、有意に違和感があると評価された ( $t(72) = 2.109, p < 0.05$ )。以上から、 $\alpha$  値に関わらず、 $D$  値が違和感の評価に影響することが示される。

一方で、 $\alpha$  値の単純主効果は、 $D$  値が 0.05 の場合でのみ有意であった ( $F(2, 72) = 12.110; p < 0.001$ )。このとき、 $\alpha$  値が 0.12 に設定された時より、0.018 および 0.025 に設定された時の方が、有意に違和感があると評価された (0.12 vs. 0.018:  $t(72) = 4.772, p < 0.001; 0.12$  vs. 0.025:  $t(72) = 3.430, p < 0.005$ )。 $\alpha$  値が 0.018 と 0.025 の組み合わせの評価値の差異は有意ではなかった ( $t(72) = 1.342, n.s.$ )。

柔らかさおよび違和感の評価に関して、各条件を無操作条件と比較した。ベースライン (図 6 および図 7 の赤線) と各組み合わせのペアについて、対応のある両側  $t$  検定を行った。結果を表 1, 2 にまとめた。柔らかさ得点と不快感

表 1 柔らかさの  $t$  検定結果

$D$	$\alpha$	$t$ 値	$p$
0.05	0.018	6.401	< 0.001
	0.025	4.159	0.001
	0.12	0.811	0.433
0.2	0.018	6.655	< 0.001
	0.025	7.242	< 0.001
	0.12	3.293	0.006
0.35	0.018	6.431	< 0.001
	0.025	7.273	< 0.001
	0.12	4.463	< 0.001

$df = 12$ ; 有意水準 = 0.006

表 2 違和感の  $t$  検定結果

$D$	$\alpha$	$t$ 値	$p$
0.05	0.018	6.177	< 0.001
	0.025	4.521	< 0.001
	0.12	2.604	0.02
0.2	0.018	9.181	< 0.001
	0.025	10.6	< 0.001
	0.12	8.307	< 0.001
0.35	0.018	12.317	< 0.001
	0.025	12.06	< 0.001
	0.12	7.151	< 0.001

$df = 12$ ; 有意水準 = 0.006

得点ごとに 9 回の検定を繰り返したため、ボンフェローニ補正を適用した。補正後の有意水準は 0.006 であった。

柔らかさ得点については、 $D$  が 0.05、 $\alpha$  が 0.12 の組み合わせ以外のすべての条件で、無操作条件に比べて有意に高い得点が得られた。また、不快感得点も同様に  $D$  が 0.05、 $\alpha$  が 0.12 の組み合わせ以外のすべての条件で、無操作条件よりも有意に高い値を示した。

以上より、我々の方法は、椅子の座面を柔らかく知覚させることに成功したといえる。柔らかさの評価は、カメラの下方方向への移動量と移動速度に独立して影響された。現

実での動きの映像に最も近い $D$ が0.05,  $\alpha$ が0.12の組み合わせでは、無操作条件に近い結果であったが、それ以外の組み合わせにおいては、カメラの移動量が大きいほど、あるいはカメラの動きが遅いほど、参加者は椅子を柔らかいと評価した。ただし、参加者が椅子を柔らかいと評価する時、同様に得られる違和感も増していた。

## 5. 柔軟な背もたれを提示するインタフェースの評価

参加者は、もたれかかった椅子の背もたれがどれだけ柔軟に感じられたかを評価した。

### 5.1 実験方法

#### 5.1.1 参加者

合計15人の学部生と大学院生(女性2人, 平均年齢22.867歳,  $SD = 1.310$ )が、柔軟な背もたれを提示するインタフェースの実験(以下背もたれ実験と呼称する)に参加した。3名の参加者は座面実験に参加していた。

#### 5.1.2 実験装置

実験のためのシステム構成を図8に示す。実験に使用したHMDと椅子は座面実験と同じものを使用し、座面にはクッションを置かなかった。背もたれに加わる力を取得するために、椅子の背もたれ上部に圧力センサ(FSR406)を取り付け、そのデータをArduinoで環境を制御するPCに送信した。

床からの座面の高さや座面上の参加者の臀部の位置は、式(6)及び(7)のAoUの値が $110^\circ$ であること、および、肩甲骨の間の点より少し下の位置で圧力センサを押していることを満たすように参加者ごとに調整された。また、背もたれと椅子の座面との角度(すなわち、AoC)は $101^\circ$ であった。

#### 5.1.3 パラメータの設定

調整を重ねた結果、式(4)のfobには5レベルを設定した。100gfあたり $0.5^\circ$ ,  $1.0^\circ$ ,  $1.5^\circ$ ,  $2.0^\circ$ ,  $2.5^\circ$ の5段階である。さらに、背もたれを押してもカメラ位置が動かない無操作条件での評価をベースラインとして用意した。

#### 5.1.4 指標

各条件での体験後、以下の2つの質問を順に行った。1つは、背もたれの柔軟性についてであった。「背もたれに力をかけた時どのような背もたれであるように感じましたか?」という質問に対し、1(非常に硬い)から7(非常に柔らかい)の7段階評価で回答を選択させた。もう1つの質問は、不快感についての質問であった。「背もたれに力をかけた時に違和感がありましたか?」との質問に対し、こちらも1(全く無い)から7(非常にある)までの7段階評価で回答を選択させた。

#### 5.1.5 手順

参加者は実験について簡単な説明を受けた後、インフォームドコンセントに署名した。指示を与える前に、尾てい

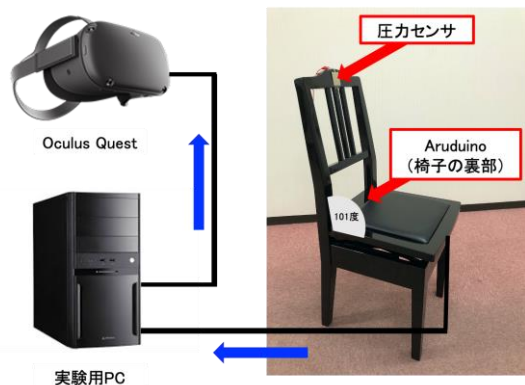


図8 システム構成

骨から第7頸椎までの背中長の長さを測定した。その長さの3分の2を、式(6)と(7)の $r$ の値とした。また第7頸椎からこの長さの3分の1下がった点を、圧力センサへの接触点とした。上記の要件と測定した長さをもとに、椅子の座面を調整し、座面に座る位置の印をつけた。準備が終わったら、実験の詳細を参加者に説明し、背もたれにもたれかかり、背もたれを押す練習をさせた。

実験は3つのブロックで構成され、各ブロックには6回の試行が含まれている。各ブロックの条件の順番は、参加者ごとにランダムに決定した。各ブロックの開始時には、座面実験と同様に、VR環境におけるカメラの位置と方向を調整した。

1試行の流れは以下の通りであった。各試行は、参加者が背もたれにもたれずに椅子に座っている状態で開始した。実験者の合図で、参加者は背もたれにもたれかかり、背もたれへと徐々に力を加えた。圧力センサに加わる力が2kgfに達した時に、ピーブ音を鳴らした。参加者は、ピーブ音が鳴ったらすぐに、徐々に押す力を弱めていき、最後は背もたれから背を離し、開始時の姿勢に戻った。そして参加者自身のペースで、再び背もたれにもたれかかって押すことを繰り返した。背もたれを押す回数は1試行で5回であった。背もたれを押している間は、カメラの位置を式(4)~(7)で制御した。5回目の押下でスタート位置に戻った後は、座面実験と同様に、柔軟性と違和感についての質問に回答させた。この手順を1ブロックあたり6回繰り返し、3ブロックを実施した。ブロック間では参加者に十分な休息を与えた。

### 5.2 実験結果

各条件の柔軟性と不快感の両方の平均得点を図9に示す。fobが0の点が無操作条件(ベースライン)である。まず、柔軟性得点へのfobの影響を被験者内ANOVAで分析した。その結果、fobの主効果が有意であった( $F(5, 70) = 27.847, p < 0.001$ )。我々の方法を適用したすべての条件において、柔軟性得点は、無操作条件よりも有意に高かった(すべてのペアにおいて、 $t(70) > 5.400, p < 0.001$ )。また、fobの値



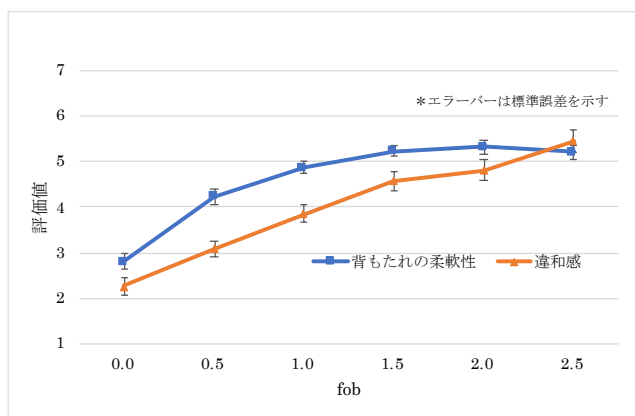


図9 背もたれの柔軟性と違和感の評価

が 1.0 以上の条件では、fob の値が 0.5 の場合と比較して、柔軟性得点が有意に高くなった（すべてのペアにおいて、 $t(70) > 2.400$ ,  $p < 0.020$ ）。fob が 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 の条件では、fob が 1.0 と 2.0 の差異に有意傾向があったが ( $t(70) = 1.710$ ,  $p < 0.01$ )、他の全てのペアでは有意な差はなかった（すべてのペアにおいて、 $t(70) < 1.370$ ,  $n.s.$ ）。

不快感得点は異なる傾向を示した。被験者内 ANOVA の結果、fob の有意な主効果が明らかになった ( $F(5, 70) = 24.167$ ,  $p < 0.001$ )。多重比較の結果、不快感得点は直線的に増加することが示された。fob が 1.5 と 2.0 のペア、および 2.0 と 2.5 のペアでのみ、その差が有意ではなかった (1.5 vs 2.0:  $t(70) = 0.657$ ,  $n.s.$ ; 2.0 vs 2.5:  $t(70) = 1.904$ ,  $n.s.$ ) が、それ以外のペアでは有意に達した(すべてのペアにおいて、 $t(70) > 2.150$ ,  $p < 0.05$ )。

本実験でも、VR 環境下でカメラの動きを操作することで、実際の椅子の触感を変化させることに成功した。柔軟性得点は fob の値が 1.5 または 2.0 の条件付近でピークを迎え、fob の値を 2.5 に設定した条件では、わずかに減少した。一方、違和感得点は、fob の値を大きくすると直線的に増加した。さらに、両実験で同様の質問がなされていることを考慮に入れると、全体的に座面実験の方が背もたれ実験よりも違和感が高いことがわかる。そして両方のインタフェースを体験した多くの参加者は、背もたれ実験のインタフェースの方が好みであるとコメントしていた。

## 6. 考察

本研究では、VR 環境から期待される触感と現実環境から知覚される触感の乖離を埋めることを目的としている。VR 環境におけるユーザの視点位置（カメラ位置）を操作することで、現実環境からの触覚情報を上書きして変化させる手法を提案した。

本手法を用いて 2 つのインタフェースを開発し、その評価を行うことで、本手法の有効性を示した。1 つは着座した座面を低反発な座面のように知覚させるインタフェース、

もう 1 つは力をかけた背もたれを柔軟性のある背もたれのように知覚させるインタフェースである。4 章および 5 章で述べた実験結果の通り、VR 環境内でのカメラ位置（視点）に動きを加えるだけで、参加者は柔らかい座面と柔軟な背もたれを知覚することができた。

### 6.1 違和感の軽減に向けて

いずれの実験でも、すべての条件において、ベースラインのスコアよりも有意に高い違和感スコアが得られた。このような違和感は、実際の姿勢と視覚情報から推定された姿勢との間に不一致があるために、避けられないものであった[15]。しかし、不一致をなくすためには、装置の数や大きさと違和感の大きさの間にトレードオフの問題が生じる。実際の姿勢を視覚情報に一致するようにするには、体の一部を動かす必要がある。そうすれば違和感は減少するが、装置の数や大きさは増加することになる。

全体的な不快感得点に関して、座面実験よりも背もたれ実験の方が低い傾向があった。これは座面実験において、背もたれに背中が当たらないように、参加者の座り方に不自然な制約を課したためであると考えられる。参加者の一人は、姿勢についての指示を守ることにより気を配るあまり、視界の変化に注意を払い難かったとコメントしていた。他の参加者からも、指示通りに座ることが難しいとの意見があった。背もたれに背をつけずにまっすぐ座るという状況は、普段の生活ではあまり見られず、不自然な姿勢であると参加者に感じさせた可能性があり、このような不自然な姿勢でカメラを動かしたため、違和感が増してしまったと考えられる。このような違和感を軽減するために、座面と背もたれの 2 つのインタフェースを組み合わせ、座面と背面両方の柔らかさを提示することが 1 つの解決策として考えられる。

もう 1 つの違和感の軽減策として考えられるのは、身体の能動的な動きを反映する仕組みを取り入れることである。背もたれ実験では、参加者が背もたれを能動的に押すことで、カメラの位置に変化が生じていた。一方、座面実験では、参加者は自分の身体の動きが反映されていない映像をただ観察しているのみであった。したがって、座る際の動きに応じて映像が変化すれば、違和感を軽減させることができると考えられる。例えば、勢いよく座るときは沈み込むカメラの動きが速く、逆に慎重に座るときはカメラの動きが遅くなるような変化を加えることで、違和感が軽減する可能性がある。

### 6.2 本手法の応用例

この手法の最大の利点は、体験するにあたって必要なものは HMD だけであるという点である。実装の過程では圧力センサを使用しているが、これは簡単に取り付け使用することが可能である。HMD を装着するだけで、現実の環境からの触覚フィードバックを VR 環境へ近づけることができるため、手軽に仮想空間の臨場感を高めることができ



る。我々の手法は、物体の詳細な形状を伝えることはできないが、最小限の装置で、現実とは異なる触覚フィードバックを全身に提示することを可能とした。

本手法では、VR 環境上の物体に関わらず、現実環境上の物体を利用する。近年の研究では現実環境の構造を VR 環境に反映させる方法が提案されている [16]。そのような手法とあわせて本手法を利用すれば、オフィスの椅子をより柔らかく柔軟性のあるものに変えたり、部屋のベッドをより柔らかいものや強いバネのあるものに変えたりすることが可能である。もちろん、すべての家具の位置を調整すれば、このような VR 環境への実物の自動反映なしに体験することも可能である。

また、VR 環境に合わせ、実物体を生じさせることで、身体全体に触覚フィードバックを提示する既存研究に組み合わせることで、表現を拡張することが可能であると考えられる。例えば、TilePop[17]はタイル状の床から柔らかい立方体が飛び出し、全身に触覚フィードバックを提示するものであった。RoomShift [18] は、VR 環境内で家具が配置された場所に対応して実物体を移動させることで、部屋全体の環境を変化させて動的に知覚に変化を生じさせた。これらの研究では、現実環境における実物体の場所を変化させることで、臨場感を高めることができる。しかし、このようなデバイスは、構成素材を簡単に変えることができないため、提示する触感自体を変更することは容易ではない。一方で我々の手法の弱点は、仮想のものと同じ機能（例えば、座る、横になる、跳ぶなど）を持つ実物を、仮想のものと同じ位置に配置しなければならないことである。これらの装置と我々の方法は、装置が実物体を提供し、我々の方法が実物体の触感を変化させるという、お互いの弱点を補完し得る関係にある。

以上のように、本手法では、単独で使用可能であることは勿論のこと、他の触覚フィードバックを提示するデバイスの利用可能性や表現域をより拡大することができる。

## 7. むすび

本研究で提案する手法は、特別な装置を用いることなく、現実環境の椅子の触感を簡単に変化させることを可能にした。また、手法の体験時には、VR 環境中の対象物や自分の身体を観察する必要もない。今回は椅子を用いたインタフェースのみを開発したが、利用者が自身の姿勢から触感の変化を知覚する状況において、広く本手法を適用することが可能である。さらに他の装置や手法との組み合わせにより、様々な応用が期待される。

今後の課題として、違和感をより軽減するための解決策を模索する必要がある。

## 参考文献

- [1] Hoffman, H. Physically touching virtual objects using tactile augmentation enhances the realism of virtual environments. *IEEE 1998 Virtual Reality Annual International Symposium*, 1998, 59–63.
- [2] Fang, C et al.. Wireality : Enabling Complex Tangible Geometries in Virtual Reality with Worn Multi-String Haptics. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2020, 1–10.
- [3] Massie, T et al.. The phantom haptic interface: A device for probing virtual objects. *ASME winter annual meeting, symposium on haptic interfaces for virtual environment and teleoperator systems*, 1994, 295–300.
- [4] Sagheb, S et al.. SWISH: A shifting-weight interface of simulated hydrodynamics for haptic perception of virtual fluid vessels. In *Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 2019, 751–761.
- [5] Lecuyer, A et al.. Pseudo-haptic feedback: Can Isometric Input Devices Simulate Force Feedback?; *Proc. IEEE Virtual Real.* 2000, 83–90.
- [6] 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
- [7] 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
- [8] 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
- [9] Ban, Y et al.. Modifying an identified curved surface shape using pseudo-haptic effect. In *2012 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*. IEEE, 2012, 211–216.
- [10] Bergström, J et al.. Resized grasping in vr : Estimating thresholds for object discrimination. In *Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 2019, 1175–1183.
- [11] Dichgans, J et al.. Visual-vestibular interaction: Effects on self-motion perception and postural control. In *Perception*. Springer, 1978, 755–804.
- [12] Palmisano, S et al.. Future challenges for vection research: definitions, functional significance, measures, and neural bases. *Frontiers in psychology* 6, 2015, 193.
- [13] Matsumoto, K et al.. Unlimited corridor : redirected walking techniques using visuo haptic interaction. In *ACM SIGGRAPH 2016 Emerging Technologies*, 2016, 1–2.
- [14] 五十嵐郁瑛ら. VR 空間での視覚刺激が着座面の柔らかさ知覚に与える影響. *インタラクシオン 2020*, 2020, 702-706.
- [15] Tsakiris, M. My body in the brain: a neurocognitive model of body-ownership. *Neuropsychologia* 48, 3, 2010, 703-712.
- [16] Lin, C et al.. Architect : Building Interactive Virtual Experiences from Physical Affordances by Bringing Human-in-the-Loop. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2020, 1–13.
- [17] Teng, S et al.. TilePoP: Tile-type Pop-up Prop for Virtual Reality. In *Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 2019, 639–649.
- [18] Suzuki, R et al.. RoomShift: Room-scale Dynamic Haptics for VR with Furniture-moving Swarm Robots. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2020, 1–11.