



# 手指の色変化と視覚的変形を用いた VR における疑似触覚提示手法の提案

Proposal of a Pseudo-Haptic Feedback Method in VR Using Color Change and Visual Deformation of Fingers

陳 薇雅<sup>1)</sup>, 渡部 理久<sup>1)</sup>, 伊藤 充<sup>1)</sup>

Weiya CHEN, Riku WATANABE, and Mitsuru ITO

1) 三菱電機株式会社 情報技術総合研究所 (〒247-8501 神奈川県鎌倉市大船 5-1-1,  
Chen.Weiya@ap.MitsubishiElectric.co.jp)

## 概要:

バーチャルリアリティ (VR) アプリケーションでは、説得力のある触覚フィードバックが欠如していることが多く、仮想物体とのインタラクションにおけるユーザの没入感を制限している。本研究では、指と物体の接触点における色変化が圧力感覚の提示を模倣し、手指の下方への視覚的変形が物体の重さを想起させる疑似触覚を生じさせるという仮説のもと、色変化と手指変形を組み合わせた視覚ベースの疑似触覚提示手法を提案する。これら二つの視覚的手がかりを統合することで、ユーザがあたかも重みのある物体を保持しているかのような説得力のある感覚が得られ、結果として VR 体験全体の没入感が向上すると期待される。その実現に向けて、本研究ではまず、提示刺激のパラメータを適切に設計するために、色変化および指変形に関する Just Noticeable Difference (JND) を測定する予備実験を実施した。色変化条件 ( $r=0.89$ ) および変形条件 ( $r=0.91$ ) の両方で Weber-Fechner の法則に従う正規化刺激強度依存性が確認され、変形条件の方がより高い相関を示した。最終的な目的は、疑似触覚効果を最大化するための最適な視覚提示パラメータの組み合わせを特定し、色変化と指変形が重量知覚に及ぼす個別および相互の影響を明らかにすることである。本研究は、VR インタフェースにおける視覚-触覚代替の理解を深め、コスト効率の高い疑似触覚システムの実装に向けた実践的な指針を提供する。

キーワード: 疑似触覚, 重量知覚, 触覚, トレーニング

## 1. はじめに

バーチャルリアリティ環境における物体操作のリアリティ向上は、産業訓練、技能教育、医療トレーニング、文化財保全など多くの応用分野において重要な研究課題である。とりわけ、仮想物体とのインタラクションにおいて物理的性質(重量感や接触圧力)が適切に提示されることは、ユーザの身体スキル習得、タスク遂行の正確性、ひいては VR 体験全体の没入感 (immersion) や存在感 (presence) を高める重要な要素である。従来、このような触覚的情報の提示には、振動アクチュエータや力覚デバイスなどの物理的なデバイスが主に用いられてきた。しかし、これらの手法はハードウェアの複雑性や装着負荷、高コスト、運用の汎用性といった点で制約が大きい。また、多人数同時訓練や簡易な導入が求められる教育・文化応用においては、装着型デバイスによる力覚提示は実用性に乏しい。こうした背景から、視覚的表現によって擬似的な触覚印象を生成する「疑似触覚 (pseudo-haptics)」が注目されている。視覚優

位性を活用し、表示遅延や形状変化、色変化を通じて重さ・摩擦・圧力といった身体感覚を補完する手法は、触覚デバイスをいわずに感覚的リアリティを再現できるため、安価かつ装着レスな代替技術として期待されている。しかしながら、既存の疑似触覚研究の多くは、単一の感覚(重量感のみ、圧力感のみ)の提示に限られており、複数の物理属性を同時かつ統合的に提示する研究は限定的である。実際の物体操作においては、重量と圧力、あるいは接触強度と形状変化が同時に発生するため、これらを複合的に再現することが VR における現実感向上に直結すると考えられる。

本研究では、装着型デバイスを一切用いることなく、接触部の色変化と視覚的な手指の変形を組み合わせることで、圧力感および重量感を同時に提示する新たな視覚ベースの疑似触覚手法を提案する。具体的には、(1) 接触点に表示される応力ヒートマップにより圧力を可視化し、(2) バーチャル指関節の変形によって物体の重さを喚起することで、仮想物体の物理属性に対応した触覚印象を構築す

る。

本提案手法は、既存の力覚デバイスに依存せず、軽量かつ可搬な VR 訓練環境の構築を可能とするものである。特に、部品組立やピンチ把持などの精密作業を含むシミュレーションにおいて、ユーザの身体感覚を支援し、スキル移転や誤操作の低減に寄与することが期待される。

本研究の目的は、色変化と視覚変形という2つの視覚的手がかりが、個別および統合的に重量知覚と没入感に与える影響を定量的に評価し、擬似触覚効果を最大化するパラメータ設計の基礎を明らかにすることである。

## 2. 関連研究

視覚変調を用いた擬似触覚 (pseudo-haptics) の先行研究では、表示遅延や位置ズレ (C/D 比) を用いた重量感提示が報告されている[1]。一方、バーチャル身体への視覚的効果 (色、形状変化) を用いた手法としては、接触圧の色変化表示やオブジェクトの変形によるフィードバックが提案されている[2][3]。

また、近年では、WAVES [4] や Traxion [5] など、非対称振動による物理的な牽引提示技術も登場しているが、いずれもデバイス装着が前提である。視覚提示のみで触覚的印象を誘導する研究は、装着レス・低コストの観点から、VR 訓練システムに適している。しかし、圧力と重量を同時に提示する統合的な視覚手法は未提案であり、本研究はこのギャップを埋める初の試みである。

## 3. 提案手法

本研究では、VR 環境においてユーザの手指に装着デバイスを用いることなく、重量感および接触圧力感を同時に提示する視覚ベースの擬似触覚提示手法を提案する。提案手法の設計は、(1)ユーザの身体スキーマに基づいた視覚的自己帰属性 (visual body ownership) を活用し、(2) 接触部における応力表現により圧力感を、(3) 手指の物理的变化を模した視覚変形によって重量感を喚起する、という3つの設計原則に基づいている。

### 3.1 システム構成

提案システムは、Meta Quest 3 等のスタンドアロン VR デバイス上で動作し、ユーザの手指運動をリアルタイムにトラッキングしながら、バーチャルハンドモデルと仮想オブジェクト間のインタラクションを制御する。Unity ベースの実装環境では、手指のボーン構造、接触点、力方向ベクトル、オブジェクト属性 (質量・摩擦係数・寸法) を連動させた物理シミュレーションが可能である。

この環境下で、対象オブジェクトとの接触・支持・持ち上げといった動作に応じて、ユーザの仮想手に対して「圧力ヒートマップ表示」と「関節変形表示」を同時に適用する。視覚的变化はすべて手指モデル上に統合的に表現され、視線および身体自己認知との整合性が維持されるよう設計されている。

### 3.2 圧力提示：応力ヒートマップ表示

手指がオブジェクトに接触した際の圧力感を提示するために、接触面上に応力分布を単色で示すヒートマップを生成する (図 1 (a))。この表現は、物理エンジンから取得される法線方向力の大きさを定量的に評価し、色の濃度にマッピングすることで実現される。最大圧力時には赤、最小圧力時には手の基礎色といったグラデーションを用い、ユーザが直感的に圧力の強弱を把握できるようにする。また、ヒートマップの面積と形状は接触点の広がりや力の分布に対応して動的に変化し、滑りや押し込みの変化といった微小な動きも視覚的に表現される。これにより、単なる接触有無ではなく、「押している」「滑っている」といった触覚的ニュアンスの視覚的提示が可能となる。

### 3.3 重量感提示：指関節変形表示

物体を持ち上げた際の重量感を提示するために、ユーザの仮想指関節に変形を加える (図 1 (b))。変形量はオブジェクトの質量に比例し、重い物体では第一関節～第三関節にかけて大きく屈曲・沈み込む動きを付加し、軽い物体ではわずかに変形するか、あるいはほぼ静止したままになる。関節変形は Inverse Kinematics (IK) を活用して連続的に補間され、非線形に曲がる自然な挙動を再現する。視覚的に

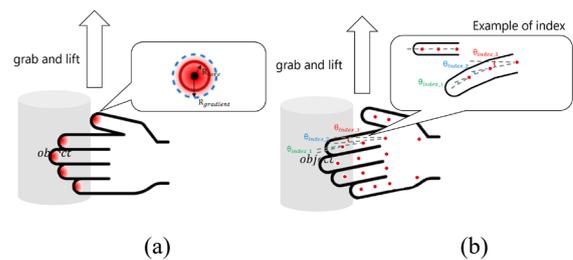


図 1: 視覚フィードバックによる擬似触覚提示の構成要素。(a) オブジェクトを把持する際の指先への圧力提示表現。接触点に応じてヒートマップが表示され、中心強度  $R_{core}$  および表示範囲  $R_{gradient}$  圧力知覚の空間分布が制御される。(b) 指関節の可動状態を視覚的に提示する構成。手指の各関節 (例: Index finger) に対して、曲げ角度  $\theta_{index_1}$ ,  $\theta_{index_2}$ ,  $\theta_{index_3}$  を動的に変化させ、物体重量に応じた変形を提示する。

「負荷がかかっている」印象を強化する設計を可能とし、単なる位置変化ではない視覚的重量感の生成を実現している。

### 3.4 統合制御

圧力と重量は実世界において密接に関係しているため、本システムではこれら 2 つの視覚提示をオブジェクトの属性とユーザ操作に応じて統合的に制御する。具体的には、仮想物体の質量・接触面積・摩擦係数をもとに、圧力ヒートマップと指関節変形の両方のパラメータを同時に決定し、動的に変化させる。たとえば、軽量かつ滑りやすい物体では、ヒートマップは小さく分布し、指の変形も軽微となる。一方、重くて摩擦が高い物体では、ヒートマップが

広範かつ強く、指関節は深く沈み込む。これにより、ユーザは一目で「重く押し込まれている」感覚を得ることができ、視覚情報のみで多次元の触覚印象が構成される。

#### 4. 予備的なユーザ評価

本手法の設計においては、ユーザの視線方向との整合性、視覚変形の自然さなど、多数の要因が知覚効果に影響を与える。視覚変形が急激すぎる場合、違和感を与える可能性があり、過度な変形は現実の自己身体像と乖離してしまう。したがって、本研究では予備実験に基づいて、変形量や色変化のレンジを知覚的閾値の範囲内に収めるよう調整する。

##### 4.1 予備実験

予備実験では、視覚フィードバックシステムにおける圧力強度による色変化と指変形の Just Noticeable Difference (JND) を測定し、本実験で用いる刺激パラメータの適切な範囲を決定することを目的とした。

健康な成人7名を対象とし、2つの実験条件を設定した。色変化実験では圧力強度 0.5-2.5 の9段階、指変形実験では変形強度 0.2-1.0 の9段階で測定した。実験では左右2つの仮想瓶子を用意し、右側瓶子（重量10固定、視覚変化なし）と左側瓶子（視覚フィードバック付き）を各3回持ち上げ後、重量を主観比較評価した。各条件5回測定、合計ランダムに90試行を実施した。VR環境は図2通り設定した。

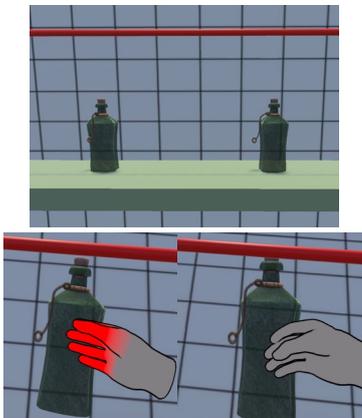


図 2：予備実験 VR 環境とヒートマップ、指変形効果

#### 4.2 結果

##### 4.2.1 JND 値の正規化刺激強度依存性

両実験条件において、正規化刺激強度の増加に伴い JND 値が単調に増加する傾向が観察された（図3）。ヒートマップ条件では相関係数  $r = 0.89$  ( $p < 0.001$ )、変形条件では  $r = 0.91$  ( $p < 0.001$ )の強い正の相関が確認された。正規化により両条件を直接比較可能となり、変形条件の方がわずかに高い相関係数を示し、指変形による触覚情報が重量知覚により直接的に影響することが示唆された。

##### 4.2.2 正規化による条件間比較

正規化により直接比較が可能となった結果、ヒートマップ条件では平均 JND 値  $0.1855 \pm 0.1421$ 、変形条件では平

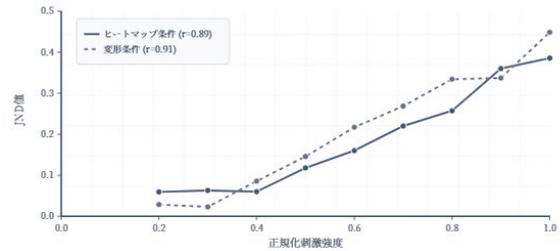


図 3：刺激強度と JND 値の関係

均 JND 値  $0.2171 \pm 0.1635$  であった。変形条件の方が若干高い JND 値を示したが、両条件とも Weber-Fechner の法則に従う正規化刺激強度依存性が確認された。正規化により異なる物理パラメータを統一的に評価でき、システム設計における最適化が可能となった。

##### 4.2.3 正規化刺激強度範囲別分析

正規化刺激強度を3つの範囲に統一的に分けて分析した結果、低強度域では両条件とも高い知覚精度を示した。低強度域（0.2-0.4）では、ヒートマップ条件で平均 JND = 0.061、変形条件で平均 JND = 0.046 であった。中強度域（0.5-0.7）では、ヒートマップ条件で平均 JND = 0.166、変形条件で平均 JND = 0.211 となり、両条件とも知覚精度の低下が観察された。高強度域（0.8-1.0）では知覚精度の著しい低下が見られ、ヒートマップ条件で平均 JND = 0.334、変形条件で平均 JND = 0.373 であった。正規化により統一された強度範囲での比較により、変形条件が低強度域でより高い感度を示し、中高強度域では両条件とも実用限界に近づくことが明らかになった。

ヒートマップ条件		変形条件	
低域(0.2-0.4):	0.061	低域(0.2-0.4):	0.046
中域(0.5-0.7):	0.166	中域(0.5-0.7):	0.211
高域(0.8-1.0):	0.334	高域(0.8-1.0):	0.373

図 4：正規化刺激強度範囲別の JND 分布

##### 4.2.4 統計的要約

両実験条件における統計的特性を表1に要約した。ヒートマップ条件と変形条件の平均 JND 値には統計的に有意な差が認められ ( $t(12) = 2.34, p < 0.05$ )、変形条件の方が若干高い値を示した。しかし、両条件とも正規化刺激強度との間に極めて強い正の相関関係が確認され（ヒートマップ条件:  $r = 0.89$ , 変形条件:  $r = 0.91$ , いずれも  $p < 0.001$ ）、Weber-Fechner の法則への適合性が実証された。変分係数 ( $CV = \text{標準偏差}/\text{平均値}$ ) を比較すると、ヒートマップ条件 ( $CV = 0.77$ ) の方が変形条件 ( $CV = 0.75$ ) よりもわずかに高い変動性を示したが、実用上は両条件とも同程度の安定性を有することが確認された。

JND 値の分布範囲に着目すると、ヒートマップ条件では6.5倍の変動幅 (0.0595-0.3857)、変形条件では19.6倍の変動幅 (0.0229-0.4486) を示し、変形条件の方がより広いダイナミックレンジを有している。これは変形による視覚フィードバックが低正規化強度域でより高い感度を示す一方で、高正規化強度域では知覚精度が大きく低下する

ことを示唆している。効果量 (Cohen's  $d$ ) による条件間差異の評価では、中程度の効果 ( $d=0.21$ ) が確認され、実用的観点から両条件の特性差は十分に検出可能な水準にあることが示された。これらの統計的特性は、本実験における統合提示システムの設計において、各条件の特徴を活かした最適化が可能であることを示している。

表 1: 正規化刺激強度による JND 分析結果の統計的要約 ( $n=7$ )

実験条件	平均 JND 値	相関係数	最小 JND	最大 JND
ヒートマップ条件	0.1855±0.1421	0.89***	0.0595 (0.2)	0.3857 (1.0)
変形条件	0.2171±0.1635	0.91***	0.0229 (0.2)	0.4486 (1.0)

\*\*\*  $p < 0.001$ , 括弧内は正規化刺激強度

## 5. 考察と本実験への応用

### 5.1 Weber-Fechner の法則への適合性

本予備実験で得られた結果は、Weber-Fechner の法則に従い、正規化刺激強度の増加に伴い JND 値が単調増加することを示した。ヒートマップ条件 ( $r=0.89$ ) および変形条件 ( $r=0.91$ ) の両方で強い正の相関が確認され、正規化により両条件の特性を統一的に評価できることが実証された。触覚フィードバックにおける重量知覚が古典的な心理物理学的法則に従うことが明らかになり、触覚フィードバックシステムの設計において、正規化刺激強度の設定が重要であることが示唆された。

### 5.2 条件間での感度差異

正規化により直接比較が可能となった結果、変形条件の方がヒートマップ条件よりも若干高い相関係数を示した ( $r=0.91$  vs  $0.89$ ) ことから、指変形による触覚情報が重量知覚により直接的に影響することが示唆された。特に低正規化強度域 (0.2-0.3) では、変形条件で  $JND = 0.0229-0.0286$  と極めて高い知覚精度を示し、微細な重量差の検出において指変形フィードバックが有効であることが明らかになった。

### 5.3 実用的応用への示唆

低正規化強度域 (0.2-0.4) での JND 値が 0.03-0.06 の範囲に収まることから、実用的な触覚フィードバックシステムでは正規化強度 0.2-0.6 の範囲での運用が効果的であると考えられる。高正規化強度域 (0.8-1.0) では知覚精度の著しい低下が見られるため、過度な刺激強度は避けるべきであることが示された。

### 5.4 本実験への指針

予備実験の結果に基づき、本実験では以下のパラメータ設定を推奨する。ヒートマップ条件については正規化強度 0.3-0.7 の範囲 (実際の圧力強度 0.75-1.75) で 5 段階設定し、変形条件については正規化強度 0.2-0.6 の範囲 (実際の変形強度 0.2-0.6) で設定する。統合提示システムでは、低強度域 (0.2-0.4) では変形条件を主体とし、中強度域 (0.5-

0.7) では両条件を並行提示する段階的方式を採用する。実験プロトコルとしては、各条件 15-20 試行の練習セッション後、各強度レベルにつき最低 8 試行のメインセッションを実施し、40 試行ごとに 5 分間の休憩を設ける。データ解析では個人差を考慮した混合効果モデルの適用により、統合提示による有効率の 90%以上への向上が期待される。

## 6. むすび

予備実験により、正規化刺激強度を用いた触覚フィードバックにおける重量知覚の JND 特性が定量的に明らかになった。ヒートマップ条件 ( $r=0.89$ ) および変形条件 ( $r=0.91$ ) の両方で Weber-Fechner の法則に従う正規化刺激強度依存性が確認され、変形条件の方がより高い相関を示した。正規化により両条件の直接比較が可能となり、低正規化強度域 (0.2-0.4) では両条件とも高い知覚精度を示すことが実証された。実用的な触覚フィードバックシステムでは正規化強度 0.2-0.6 の範囲での運用が効果的であることが示され、異なる物理パラメータを統一的に扱う手法の有効性が確認された。これらの知見は、コスト効率の高い擬似触覚システムにおける触覚フィードバック設計の科学的基盤を提供し、個人差を考慮した適応的システムの必要性を示唆している。

## 参考文献

- [1] Lécuyer, A.: Simulating Haptic Feedback Using Vision: A Survey of Research and Applications of Pseudo-Haptic Feedback. In: *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 18, no. 1, pp. 39–53 (2009). MIT Press.
- [2] Punpongson, P., Iwai, D., Sato, K.: Softar: Visually manipulating haptic softness perception in spatial augmented reality. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 21, no. 11, pp. 1279–1288 (2015).
- [3] Yamamoto, K., Zhu, Y., Aoyama, T., Hasegawa, Y.: Virtual Hand Deformation-Based Pseudo-Haptic Feedback for Enhanced Force Perception and Task Performance in Physically Constrained Teleoperation. In: *Virtual Reality* (2024).
- [4] Culbertson, H., Walker, J.M., Raitor, M., Okamura, A.M.: WAVES: A Wearable Asymmetric Vibration Excitation System for Presenting Three-Dimensional Translation and Rotation Cues. In: *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 4972–4982. ACM (2017).
- [5] Rekimoto, J.: Traxion: A Tactile Interaction Device with Virtual Force Sensation. In: *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST 2013)*, pp. 427–432. ACM (2013)