



視触覚刺激の詳細度の差異が粗さ知覚に与える影響

The effect of differences in the level of detail of visuo-haptic stimuli on the perception of roughness.

藤原俊介¹⁾, 盛川浩志¹⁾

Shunsuke FUJIWARA, Hiroyuki MORIKAWA

1) 東京工科大学 (〒192-0982 東京都八王子市片倉町 1404-1, m0a202511@edu.teu.ac.jp)

概要: 仮想空間で同位置に呈示される視覚刺激と触覚刺激の詳細度の差異が, 触覚知覚に及ぼす影響について調査した. 円柱形状と顔形状の二種類の物体を対象として, 視覚刺激に比べて触覚刺激が粗いかどうかを評価させた. 実験の結果, 円柱では指先の二点弁別閾以下の細かさの触覚刺激では, 視覚刺激の詳細度に関わらず粗さの評価に差異は生じなかった. 顔形状では, 視覚刺激に対して粗い触覚刺激を呈示した際に同じ粗さであると評価された.

キーワード: VR, クロスモーダル, 触覚, 視覚

1. はじめに

VRにおける臨場感や現実感の向上には, 触覚情報の呈示が重要な要素の一つとなる. 視覚的に呈示される物体の形状と, その物体を触ったときの触覚を完全に一致させて呈示することができれば, 極めて臨場感の高いVRの体験が可能となると期待される.

現実的には, 触覚呈示技術は未だ発展途上であり, 多くの触覚呈示デバイスが市場にも登場しているものの, 表示される物体を触れた際の触覚刺激を完全に再現できるまでには至っていない.

他方で, 現実の物体を3Dのデータにする3Dスキャン技術や, 3Dデータを現実の物体として出力する3Dプリンタの技術が一般的になりつつある. これらの技術を活用することで, VRで視覚的に呈示する3Dモデルと, そのモデルと全く同じ形状の実物体を作成することが可能になる. このモデルと実物体を同時に同じ位置に呈示することで, 見えているものと触っているものが同じであるという, 理想的なVR体験を疑似的に再現することが可能である.

ここで, 視触覚刺激はお互いに相互作用し, それぞれの感覚が影響しあうことが, クロスモーダル効果として知られている. 見えているものと触っているものが同じという状況は理想的であるものの, 現実的にはそれぞれの情報に差異が含まれていることが考えられる.

例として, 3Dスキャンによるモデルデータは容量が大きくなる傾向があり, CG表示の負荷の面からデータ量の削減を行うことが一般的である. その場合, できるだけ見た目を維持したままデータ削減を行うことが必要

であるが, モデル形状の詳細度に差異が生じることは避けられない. この時, 触覚刺激として呈示するモデルとに形状の差異が生じることになる. このようなデータの削減による視覚刺激と触覚刺激の差異が, 触覚知覚の印象にどのような影響を与えるかについては, 検証の例が少ない.

そこで本研究では, VR空間で視覚的に呈示される物体と, 触覚情報として呈示される物体の形状との詳細度の差異が, 触覚知覚に対してどのような影響を与えるかについて, 粗さ感覚を評価対象として調査を行った. 特に, 単純図形での差異の影響に加えて, 形状に対する事前知識があるものを対象とした場合の影響についても着目した. 具体的には, 人物の顔などのモデルを実験刺激とすることで, 顔の形状に関する事前知識が, 触覚知覚の変化に影響するかについても検討を行う.

2. 実験方法

2.1 実験刺激

視触覚刺激とするモデルの形状については, 円柱と顔形状を選択した. それぞれの形状について, 滑らかさを変化させたモデルを複数用意し, 視覚刺激と触覚刺激で滑らかさの異なるモデルを観察および接触した際の粗さ感覚の評価を行った.

円柱については, 円柱側面の滑らかさを変化させた. 滑らかさの変化は底面の面数で調整し, 一番粗いモデルの底面を9角形として, 18角形, 36角形, 72角形のモデルを用意した.

円柱モデルのデータはCG制作ソフト(Maya, Autodesk)

を用い、底面の面数をソフト上でパラメータとして指定して作成した。円柱の直径は、18角形における1辺の長さが、指先の二点弁別閾[1]とほぼ同等の2mmとなるように設計し、11.34mmとした。円柱の高さは、側面を周方向に指でなぞるように触ることを意図して、人差し指の幅にあたる第2指遠位関節幅の、成人男性95パーセンタイル値である17.1mmを参考に、その約2倍の34mmとした[2]。

触覚刺激となる実物体は3Dプリンタ（Adventurer3, Flashforge）にて出力した。積層ピッチは0.18mmで、フィラメントの素材はPLAであった。実験時に固定するために、円柱側面に矩形の突起を設け、土台にはめ込むことで固定した。

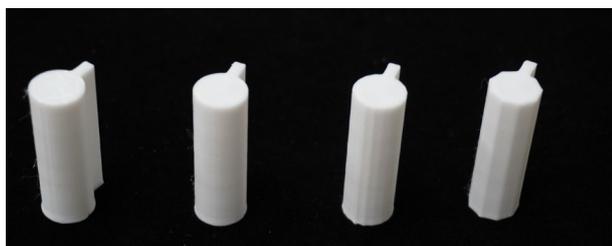


図1: 円柱モデル（左から72, 36, 18, 9角形）

顔形状モデルは、石膏胸像に対してレーザーキャナ（Revopoint POP, Revopoint）を用いて3Dデータを取得した。石膏像は一般的なもの（アグリッパ像）で、大きさは約7cm×5cm×15cmであった。スキャンしたモデルについて、後に3Dプリントする際にサポート材が出力されることによる形状の変化を防止することを意図して、首から下、耳より後ろの部分を削除し、顔前面のみのモデルとした。

得られた顔前面の3Dモデルのポリゴン数は約24万ポリゴンであった。石膏像の滑らかさは、ポリゴン数の削減度合いによってコントロールした。元のポリゴン数から、1/32, 1/128, 1/256のポリゴン数となるモデルを作成した。

ポリゴンの削減には3Dデータ編集ソフトであるMeshLabを用い、ポリゴン削減のアルゴリズムには、quadric edge collapse decimation[3]を選択した。このアルゴリズムは、削減後のモデルのポリゴン数を目標値として設定でき、数値による削減量のコントロールが可能であった。

ポリゴン数の削減を行ったのち、土台となる直方体のモデルを顔の背面に配置し、合成を行って一つのモデルとした。また、首の下の空洞部も穴をふさぎ、閉じたモデルとした。

触覚刺激となる実物体は円柱モデル同様の設定で3Dプリンタにて出力した。モデルの固定は、土台となるプレートの四角の位置をガイドとなる治具で位置を指定することで行った。

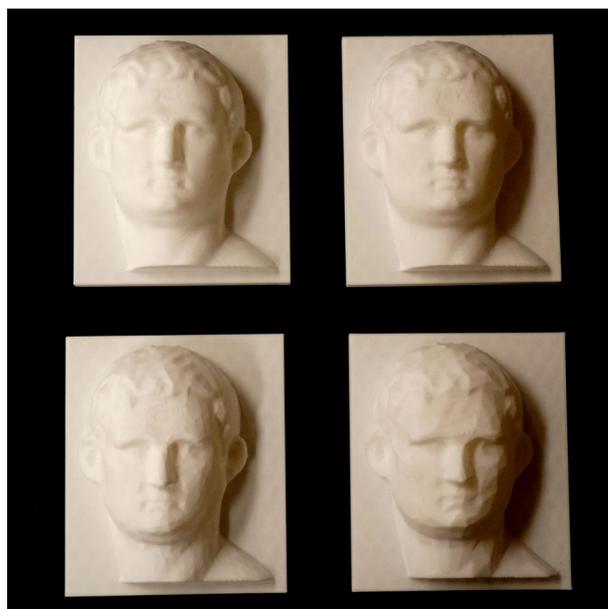


図2: 顔形状モデル
（左上: オリジナル, 右上: 1/32,
左下: 1/128, 右下: 1/256）

2.2 実験環境

視覚刺激の提示にはHMD（Meta Quest 2）を用いた。視覚刺激として提示される3Dモデルと、触覚刺激として提示される実物体モデルの位置合わせは、実物体を固定する土台に、Quest 2のコントローラも固定し、相対的な位置関係が一定になるよう配置することで行った（図3）。土台は机にクランプを用いて固定した。円柱モデルも、顔形状モデルと同じ大きさの土台を配置することで固定した。

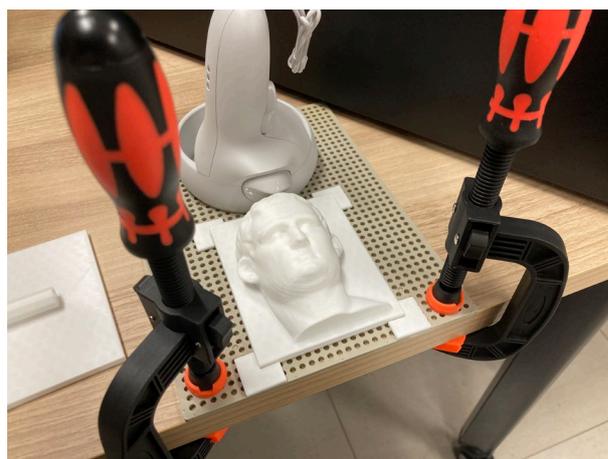


図3: 触覚刺激モデルの固定

実験参加者はHMDで3Dモデルを観察しながら、実物体を触るというタスクを行った。実物体を触る手をVR空間に表示するために、Meta Quest 2に搭載されているハンドトラッキング機能を使用した。上記VR空間の表示および制御は、ゲーム開発環境ソフトであるUnityを用いて行った（図4, 図5）。



図 4: 触覚刺激の呈示

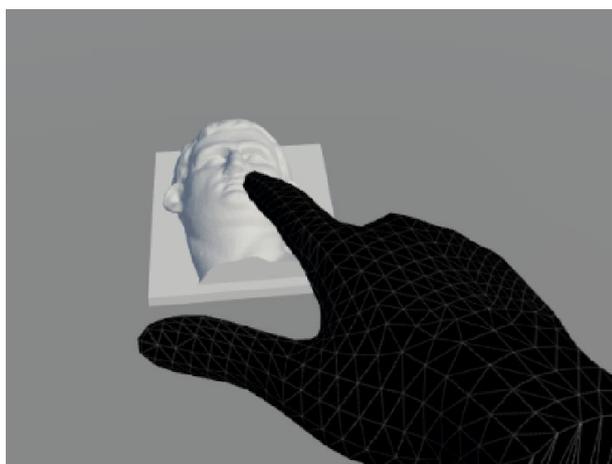


図 5: 視覚刺激の呈示

2.3 実験方法

実験では、視覚刺激として呈示されたモデルの粗さに対して、触覚刺激として呈示されたモデルが粗いか滑らかかを二肢強制選択法で回答させる、恒常法を採用した[4]。

円柱モデルの視覚刺激と触覚刺激はそれぞれ 9 角形、18 角形、36 角形、72 角形の 4 条件を用意した。また、顔形状モデルの視覚刺激と触覚刺激はオリジナルを 1/1 モデルとして、1/1、1/32、1/128、1/256 の 4 条件をそれぞれ用意した。

実験は、円柱モデルの比較実験ののち、顔形状モデルの比較実験を行うという順序で行った。4 条件の視覚刺激のうち 1 条件を呈示したまま、触覚刺激の 4 条件をランダムに呈示し、評価を求めた。4 条件の試行を 10 回繰り返し、視覚刺激 1 条件につき合計 40 回の評価を求めた。これを視覚刺激 4 条件について繰り返した。

2.4 参加者

男 7 名女 1 名の計 8 名が実験に参加した。すべての被験者が実験内容についての説明を受け、理解と同意を実験参加同意書への署名をもって確認した上で実験に参加した。

3. 結果

円柱のモデルについて、粗いと判断した確率をプロットし、散布図として表した知覚確率曲線を図 6 に示す。

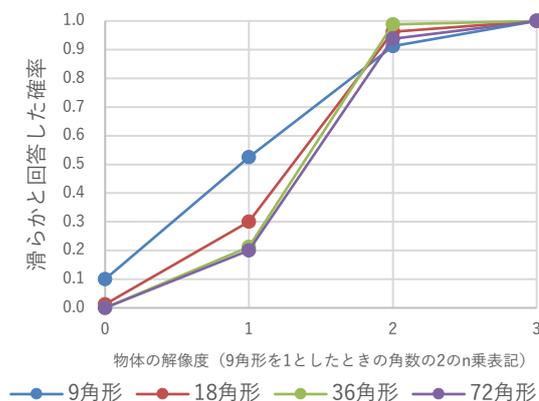


図 6: 円柱モデルの知覚確立曲線

円柱モデルに関して、物体と視覚刺激の解像度については、最も粗い 9 角形のモデル 1 としたとき、他のモデルの角数を 2 の n 乗で表したときの n で示している (18 角形 = 9×2^1 , 36 角形 = 9×2^2 , 72 角形 = 9×2^3)。

視覚刺激として 18 角形、36 角形、72 角形の条件では、視覚と触覚刺激の滑らかさが同じと判断される点である主観的等価点 (確率 50% に相当する物体の解像度、PSE) は、視覚刺激が 9 角形の条件を除いて、 n が 1.2~1.3 の点となった。これは円柱の角数でいうと、20~22 角形相当となる。また丁度可知差異 (JND) の基準となる確率 75% 点では、 n は 1.7~1.8 程度となり、これは 30 角形相当となる。

ここから、触覚刺激として 30 角形以上の滑らかさを提示しても、それ以上の角数の円柱と区別がつかなくなり、20 角形程度の滑らかさがあれば視覚と同様の滑らかさが知覚されることが推測された。ただし、視覚刺激として、20 角形以上の細かさが、画像として十分に判別できるほどの解像度をもって呈示できなかった可能性もある。

20 角形相当で滑らかさの判断が飽和する理由としては、指先の二点弁別閾よりも角の感覚が狭くなったことが考えられる。実験刺激の作成においては、18 角形の角の間隔が、指先の二点弁別閾相当の間隔である 2mm となるように設計した。そのため、20 角形相当で二点弁別閾以下の刺激間隔となり、それ以上の細かさが判断できなくなったことも推測される。

一方で、視覚刺激として 9 角形を提示した条件では、PSE がほぼ $n=1$ 付近となり、触覚刺激が 18 角形で見た目と同じ粗さだと判断されたことになる。これは、18 角形では角の間隔が二点弁別閾とほぼ同等で、かろうじて角が離れていることが知覚でき、視覚刺激において角ばった円柱であることが視認された 9 角形において、同様に角が触覚でも知覚できる 18 角形が等価点となったと考えられた。

石膏像の顔形状モデルについての知覚確率曲線を図 7 に示す。

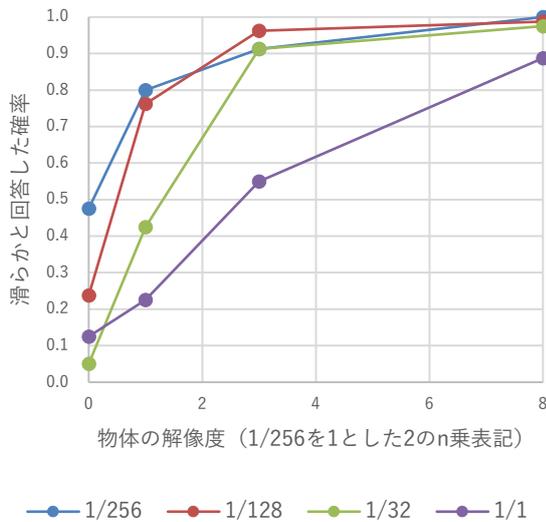


図 7: 顔モデルの知覚確率曲線

石膏像の顔形状モデルにおいても、物体と視覚刺激の解像度については、最も粗い 1/256 のモデルを 1 としたとき、他のモデルのポリゴン数を 2 の n 乗で表したときの n で示している (1/128 = 1/256 × 2¹, 1/32 = 1/256 × 2³, 1/1 = 1/256 × 2⁸)。

石膏像を用いた条件では、視覚刺激の条件によって、PSE の値がばらついた。視覚刺激 1/256 では触覚刺激 1/256、視覚刺激 1/128 では n が約 0.5 (1/256 × 2 の 0.5 乗 = 約 1/180)、視覚刺激 1/32 は約 1.3 (同様に約 1/100)、視覚刺激 1/1 では約 2.7 (約 1/40) となった。

いずれの条件でも、視覚刺激に比べて粗い触覚刺激が等価であると判断された。この結果は、視覚刺激の解像度に対して、触覚刺激はより低い解像度でも同じ形状であると判断されることを示している。さらにその差は、視覚刺激の解像度が高いほど大きい傾向が見られたが、これは視覚刺激において、滑らかさの表現に差がでなくなったことが要因であると考えられる。視覚刺激の詳細度については、円柱モデルでの実験と同様に、ディスプレイの解像度などにも影響されるため、デバイスの高度化によって、異なる結果となることも推測される。

また、触覚刺激 1/1 と触覚刺激 1/32 の比較において、視覚上では判断できない変化も、視覚刺激 1/1 の条件では、その差が回答率の差として表れていることから、触覚の分解能が二点弁別閾の特性以上に高くなっていることが推測される。この触覚の分解能が向上した理由として、形状の事前知識が、形状知覚における滑らかさの判断に作用していることが考察される。触覚の分解能が高まった理由に関しては、引き続き追加実験による検討が必要である。

また、実験終了後の自由回答としてどのような箇所で滑らか・粗いを判断していたかについて意見を収集したところ、被験者 A は頬の凹凸で判断していたが、被験者 B は鼻の鋭さで判断していたという報告があり、各参加者による判断基準の差が結果に影響したことが考えられる。事前知識のある形状については、粗さ判断の基準となる特徴点が重要となることも示唆された。

また粗さの回答において、参加者には表面上のざらつきではなく形状そのものを判断するという指示を与えていたが、3D プリンタの積層痕が影響した可能性がある。本実験では、粗さ・滑らかさという側面から評価を行ったが、複雑な形状の触覚における妥当な判断指標について今後も検討が必要である。

4. 考察

VR 空間で視覚的に呈示される物体と、触覚情報として呈示される物体の形状との差異が、触覚に対してどのような影響を与えるかについて調査することを目的とし、単純図形の円柱と、形状そのものに意味がある顔形状を対象に評価を行った。その結果以下のような知見が得られた。

- 単純な図形の視覚刺激の判断では、二点弁別閾の特性が反映された
- 複雑な図形の判断では、視覚刺激に比べて粗い触覚刺激が同等の刺激と判断された
- 事前知識のある形状の比較においては、視覚では判断できないような形状の差も、触覚では判別された
- 粗さの触覚について判断の基準となる特徴点が重要となる

本研究で得られた知見は、触覚呈示を目的としたモデルの構築などにおける、人間の特性を反映したデータ削減アルゴリズムへの応用などが期待される。

謝辞 本研究の実施には清村浩平氏に多大な協力を得た。ここに感謝を示す。

参考文献

- [1] 松田隆夫, 知覚心理学の基礎, 培風館, 2000, 294p.
- [2] 人口知能研究センター, 第 2 指遠位関節幅, AIST 日本人の手の寸法データ-寸法項目一覧, 2022. <https://www.airc.aist.go.jp/dhrt/hand/data/list.html>
- [3] Garland, Michael, and Paul S. Heckbert.: Surface simplification using quadric error metrics., Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, 1997, pp. 209-216
- [4] 中野靖久, 心理物理測定法, VISION, 1995, Vol. 7, No. 1, pp. 17-27