



運動に応じた知覚インテンシティの変調による 疑似的な粘性感覚の提示

五十嵐大登¹⁾, 高橋哲史¹⁾, 昆陽雅司¹⁾

1) 東北大学 情報科学研究科 (〒 980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01, konyo@rm.is.tohoku.ac.jp)

概要: 本研究では, 任意の音源から変換した複雑な触覚振動信号に対し, 運動速度に応じた強度変調および補助振動を用いた疑似的な粘性感覚の提示手法を提案した. Meta Quest 3 を用いた VR 環境下で, 基準刺激に 5 Hz の包絡線を持つ補助振動を付加した条件で粘性感覚と触感劣化度を評価した. その結果, 補助振動の設定による粘性感覚の顕著な増強効果は得られなかったが, 触感の著しい劣化も認められなかった. 今後において, 粘性感の増強に適した振動の調査や, 粘性感を増加させつつ, 触感の劣化の少ない補助振動設計が求められる.

キーワード: 振動提示, VR デバイス, ISM

1. 緒言

近年, VR 分野ではリアルな触覚提示への要求が高まっている. 筆者らはこれまで, 音声情報から生成した触覚信号を VR デバイスに適用する手法を提案してきた [1]. しかし, これらの先行研究ではユーザの運動情報を触覚提示に反映する仕組みが十分に検討されていなかった. 一方, 岡本らは, 人の動きの速度に応じて振動の強度を変化させ, 疑似的な粘性感覚を再現可能であることを報告している [2]. しかし, この研究では単純な正弦波を用いており, 複雑な波形への適用が未検証であった.

そこで本研究では, 任意の音源から変換した複雑な触覚信号に対して, 疑似粘性感覚を提示する手法を提案し, その有効性を検証する. 特に, 5 Hz の包絡線を持つ振幅変調波を補助振動として加えることで, 疑似粘性感覚の提示を補助可能かどうかを評価する.

2. 先行研究

2.1 任意の音源からの触覚信号の生成手法

筆者らは前報 [1] において, 音声情報を 100 Hz を境に高周波と低周波に分離し, 触覚提示に適した波形を生成する変換法を提案し, VR デバイスでの触覚提示に応用した. 高周波は Intensity Segment Modulation 法で知覚インテンシティを算出後, AM 波として出力する際の振幅を算出する [3, 4]. 低周波はピーク位置ごとに 150 Hz 帯域の狭幅 AM 波を挿入し, 幅は高周波強度に応じて調整する. [5, 1]. 変換後は VR デバイス仕様に合わせて統合提示する. このような変換処理により, 任意の音源を高・低周波成分ごとに変換し, VR デバイス上での自然な触覚提示を実現する.

2.2 振動刺激のみでの粘性感覚の疑似提示手法

振動刺激のみで疑似的な力覚を提示する手法として, 運動速度に応じて振動の強度を変化させる方法がある. Okamoto らの手法 [2] では, 運動速度に比例して振動強度を増減させ

ることで, 物体に触れた際の粘性感覚を再現できることを示している. Okamoto らは, これらの振動刺激と手の動きの同期方法について数値シミュレーションを行い, 指先の皮膚変形が物体の質量や粘性の変化にどのように対応するかを明らかにした. さらに, 実験を通じて, これらの振動刺激は, 実際の粘性の変化に加え, 被験者の粘性感覚を増強または減弱する方向に作用することが確認されている. すなわち, 運動速度に同期した振動刺激を加えると, 実際よりも粘性が強く感じられたり, 逆に粘性の変化が感じにくくなったりするといった知覚のずれが生じることが明らかとなった. 特に手の速度に同期した振動刺激は, 実際の粘性変化よりも知覚への影響が強いことが報告されている. しかし, 岡本らの研究で用いられた振動刺激は単純な正弦波に限られており, 複雑な触覚信号への適用可能性については未検討であった.

3. 提案手法: 任意の変換振動での疑似粘性感覚提示

筆者らは, 岡本らの運動速度に応じた振動強度を変化させる手法を, 我々が提案する音声から触覚信号への変換手法 (Intensity Segment Modulation 等) で得られた複雑な振動に適用することを試みた. しかし, この予備的検討の試みの中で, 単純に変換された振動の強度を動きの速さに応じて変化させるだけでは, 音源によっては粘性感覚が十分に感じられないという現象が確認された.

この課題を解決するため, 音声由来の変換振動に対して疑似力覚提示を補助する追加の振動刺激を重ねる手法を検討した. 具体的には, 任意の音源から変換された振動に対し, 補助的な振動を加えることで, 粘性感覚の提示を安定かつ拡張的に実現できる可能性を考えた.

補助振動には 5 Hz 包絡の 150 Hz キャリア AM 波を用いる. 5 Hz 振動は静的圧覚の提示に有効であることが示されている [?], この低周波知覚が粘性感覚の強化に寄与すると期待される. 図 1 に, 本研究で用いた補助振動の波形を

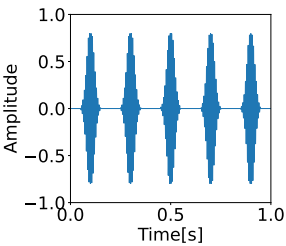


図 1: 補助振動の波形例 (150 Hz キャリア周波数, ガウス包絡線)

示す. この波形はキャリア周波数 150 Hz, 200ms 周期のガウス関数型包絡線を持つ振幅変調波であり, 包絡線の幅は約 100ms である.

実験を通じて, 5 Hz の包絡線を持つ補助振動の効果を検証し, 疑似粘性感覚の提示補助手法としての有用性を明らかにする.

4. 粘性感覚の再現性と元の触感の保持性の検証

4.1 実験概要

本実験では, 提案手法による疑似粘性感覚の再現性および元の触感の保持性を評価することを目的とした.

被験者は 20 代男性 5 名. Meta Quest 3 と Unity・Meta XR Haptics SDK で振動提示を行い, ピンクノイズ下で比較評価を実施した.

4.2 実験手順および評価方法

各条件ごとに基準刺激体験後, 評価刺激を提示し, 粘性感 はマグニチュード推定法 (基準 10 点), 劣化度は 5 段階尺度 (表 1) で評価した..

表 1: 触感劣化評価尺度

評価値	説明
5	全く劣化を感じない
4	わずかな劣化を感じる
3	劣化があるが許容できる
2	劣化が気になり, 煩わしい
1	非常に不快, 許容できない

被験者は, VR 環境上で周期的に動くオブジェクトに連動してコントローラを動かすことで, 動きの大きさや速さを統制しながら振動を体験した.

各条件 3 回× 10 条件× 3 セット, 提示順序はランダムとし, 適宜休憩を挟んだ.

4.3 刺激条件

図 2 に, 基準刺激および基準刺激に強度の異なる補助振動 (ゲイン 0.1~0.5) を重畳した計 6 条件の波形例を示す. なお, (a) は基準刺激のみ, (b) ~ (f) は提案手法で用いた

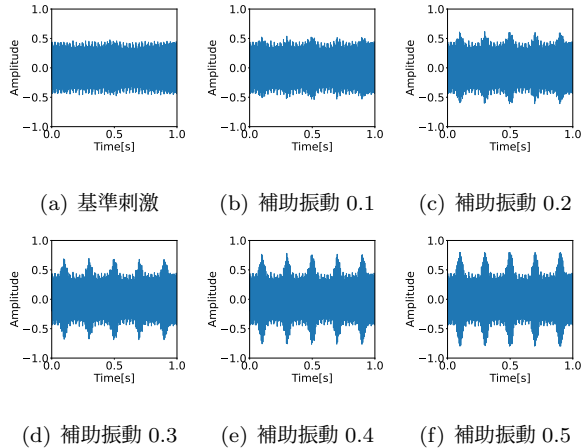


図 2: 基準刺激 (a) と, 最大ゲイン 0.1~0.5 の補助振動を加えた波形例 (b~f). 補助振動は 150 Hz キャリア, 200 ms 周期 AM 波. 横軸: 時間 [s], 縦軸: 振幅.

代表的な評価刺激であり, 実験で提示した 10 条件のうち, 補助振動の有無および強度に対応する 5 条件を含んでいる.

本実験で用いた基準刺激は, キャリア周波数 400Hz, 包絡線周波数 40Hz の振動信号 (数式で表すと, $0.5(1 - \cos(2\pi \times 40t)) \sin(2\pi \times 400t)$) を基に, Intensity Segment Modulation (ISM) 法により 150Hz のキャリア周波数の振幅変調波 (AM 波) へ変換したものである. この変換後の信号は Meta XR Haptics SDK の Amplitude パラメータが 0.5 になるようにゲイン調整されている.

評価刺激は 10 条件から構成され, 補助振動を含まない 5 条件は基準刺激の固定ゲイン 0.5 に対し, 追加で 0.1 から 0.5 まで段階的にゲインを加えたものである. これらは補助振動なしに強度を変化させた比較対象条件として設計されている.

一方, 補助振動を含む 5 条件は, 基準刺激の固定ゲイン 0.5 に対して, 最大強度が 0.1~0.5 の範囲で変化する提案手法の補助振動を加えたものである. 補助振動はキャリア周波数 150 Hz, 200 ms 周期のガウス関数型包絡線を持つ AM 波であり, このガウス包絡線の標準偏差 σ は約 16.7 ms で, 波形全体の幅として一般に用いられる 6 σ 幅が約 100 ms となっている.

また, 本実験では VR 環境内でのコントローラの速度に応じて振動の強度を変調している. 具体的には, コントローラの速度が 0.05 m/s を閾値とし, この速度以下では振動は提示されない. ゆっくりとした動作時 (0.05 m/s) にはゲインが 0.05 に設定され, 速い動作時 (0.9 m/s) にはゲインが 1 となり, それらの間は速度に対して線形にゲインを変化させている.

4.4 実験結果・考察

本研究で得られた粘性感覚および触感劣化度の評価結果を図 3 および図 4 に示す.

図 3 は粘性感覚 (Normalized Stickiness Sensation) の評価結果であり, 各条件の評価値を基準刺激における評価

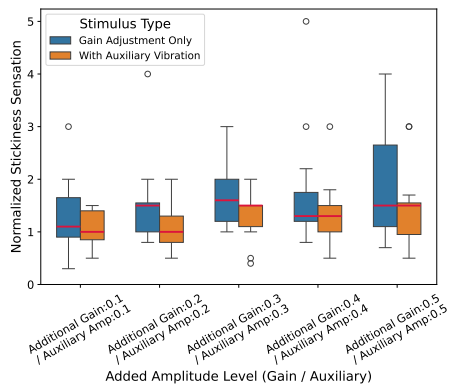


図 3: マグニチュード推定法での粘性感の評価

(10 点) で割ることによって正規化した値を示している。

まず、補助振動の有無による粘性感覚の違いについて、各追加ゲイン条件ごとに対応のある Wilcoxon 符号付順位検定を実施したが、いずれも有意差は認められなかった（補助振動の有無による各ゲイン段階での p 値はすべて 0.05 以上）。また、触感劣化度 (Degradation Rating) についても同様に、補助振動の有無で有意な違いは観測されなかった。これらのことから、本研究で用いた補助振動およびゲイン設定では、粘性感覚の増加や明確な効果は確認できなかった。

また、追加ゲインの増加に伴う主観評価の変化について Friedman 検定を実施したところ、補助振動なし条件では 5 段階ゲイン間で有意な差が認められた（統計量=12.57, $p=0.014$ ）が、補助振動あり条件では有意差は得られなかった（ $p < 0.05$ ）。多重比較（Bonferroni 補正付き Wilcoxon 検定）でも全ての条件ペアで有意な差はみられなかった（補正後 p 値はすべて 0.625 以上）。

また、効果量 (Cohen's d) の算出では、ゲイン 0.1 と 0.4 の比較などで“中～大”の効果量が得られたケースも一部存在したが、全体の傾向としては補助振動やゲイン調整による粘性感覚の増加は明瞭ではなかった。また、追加ゲインが高い条件では主観評価の分散や IQR が増加する傾向もみられ、刺激強度が高くなるほど個人差や評価のばらつきが大きくなることが示唆された。

触感劣化度 (図 4) については、多くの条件で中央値が 4 ～5 に分布し、「全く劣化を感じない」あるいは「わずかな劣化」と評価されていた。補助振動や追加ゲインの有無による触感劣化の体系的な変化や顕著な悪化も観測されなかった。

以上より、今回の補助振動およびゲイン条件では、粘性感覚の明確な増加や触感の大きな変化は見られず、全体として効果は限定的であった。一方、ばらつきや効果量の大きな条件も一部みられ、個人差や主観的な感じ方の違いも存在する可能性がある。

なお、本研究は被験者数が少なく、個人差や評価値のばらつきの影響が結果に及ぼす可能性が高いことにも留意する必要がある。より信頼性の高い結論を得るためには、今後サンプル数の拡大やパラメータ設定の最適化、および個人差に着目した詳細な解析が課題となる。

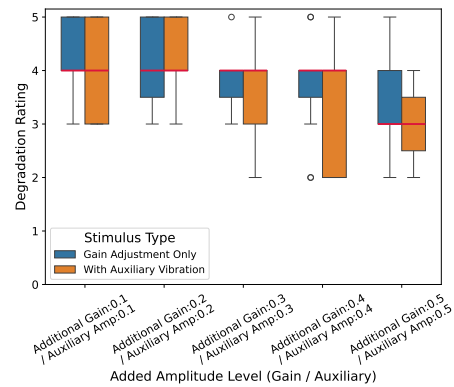


図 4: 劣化尺度での触感の評価

5. 結言

本研究では、任意の音源から変換した複雑な触覚振動信号に対して、運動速度に応じた強度変調および補助振動を用いた疑似的な粘性感覚の提示手法を検討し、VR 環境下での評価実験を行った。

結果として、現条件での粘性感覚増強や触感劣化の顕著な効果は得られなかった。今後はパラメータ最適化と検証例数の拡大が必要である。

参考文献

- [1] 五十嵐大登, 昆陽雅司, VR デバイスでの知覚インテンシティを用いた高臨場感振動生成法の提案-第 3 報: 低周波代理刺激と高周波振動の相互作用による体感への影響の検証-, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 2025.
- [2] Shogo Okamoto, Masashi Konyo, Satoshi Tadokoro: Vibrotactile Stimuli Applied to Finger Pads as Biases for Perceived Inertial and Viscous Loads, IEEE Transactions on Haptics, Vol. 4, No. 3, pp. 212-221, 2011.
- [3] Yamaguchi, K., Konyo, M. and Tadokoro, S.: Sensory Equivalence Conversion of High-Frequency Vibrotactile Signals using Intensity Segment Modulation Method for Enhancing Audiovisual Experience, IEEE Transactions on Haptics (2021).
- [4] 五十嵐大登, 昆陽雅司, 田所諭, VR デバイスでの知覚インテンシティを用いた高臨場感振動生成法の提案 第 1 報 感覚等価変換技術による標準振動 SDK を用いた高周波振動体感の再現, 第 29 回日本バーチャルリアリティ学会大会, 2C2-10, 名古屋市, 2024.
- [5] 和賀 正宗, 松原 亨, 昆陽 雅司, 竹下 俊弘, 竹井 裕介, 小林 健, 田所 諭, ピエゾ型振動子のための振幅変調波の包絡成分を利用した低周波体感の代理提示法, 第 24 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2023), 2023.
- [6] 昆陽雅司, 横田求, 前野隆司, 田所諭: 低周波振動刺激によって起こる静的圧覚の呈示条件, 第 11 回ロボティクスシンポジウム講演論文集, pp. 179-185, 2006.