



高周波振動の知覚インテンシティ再現による 筆記体感の疑似力覚提示

和賀正宗¹⁾, 松原亨¹⁾, 昆陽雅司¹⁾, 竹下俊弘²⁾, 竹井裕介²⁾, 小林健²⁾, 田所諭¹⁾

Masamune WAGA, Toru MATSUBARA, Masashi KONYO

Toshihiro TAKESHITA, Yusuke TAKEI, Takeshi KOBAYASHI, and Satoshi TADOKORO

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)

2) 産業技術総合研究所 (〒 305-8564 茨城県つくば市並木 1-2-1 産業技術総合研究所つくば東事業所, toshihiro-takeshita@aist.go.jp, yusuke-takei@aist.go.jp, takeshi-kobayashi@aist.go.jp)

概要: 本研究では高周波の知覚インテンシティを再現する手法である Intensity Segment Modulation (ISM) を利用し, 振動により鉛筆筆記時の摩擦力を疑似的に提示することを目指す。鉛筆の振動は ISM 適用の効果が確認されている極薄 PZT-MEMS を搭載したスタイラスで提示する。荷重と速度を制御可能なかつ振動と摩擦力を計測できる筆記装置を製作し, 摩擦力が段階的に変化する振動を計測した。計測波形に ISM を適用し被検者実験を行った結果, 提案手法により摩擦力を表現できることが確認された。

キーワード: 振動触覚, 高周波, 疑似力覚提示

1. 緒言

近年のスマートフォンやゲーム用コントローラには振動子が搭載され, 通知やゲームの臨場感の向上のための触覚フィードバックが普及している。一方で, 力覚ディスプレイは把持や重さ感覚のフィードバックに適しており医療分野などで応用されているが, 装置が大型化しやすくコストが高いため, 未だ一般に普及していない。そのため, デバイスに搭載しやすい小型振動子で疑似的に力覚提示を行う技術が求められている。

これまでに振動による摩擦感 [1] や慣性感・粘性感 [2] の疑似力覚提示法が提案されている。昆陽らは物体との接触の際に生じる Stick-Slip 運動をクーロン摩擦を伴う 1 自由度振動系モデルを用いて再現し, 応答性の高い FA II を高周波振動で刺激することで, 摩擦感を提示している [1]。岡本らは接触対象の慣性・粘性の変化を考慮した振動刺激により機械受容器に皮膚のせん断変形の錯覚を起こす手法を提案し, 慣性感と粘性感を提示している [2]。これまで振動による疑似力覚提示の有効性が確認されているが, 様々な周波数を含む振動体感に対して疑似力覚提示に成功した例は筆者らが知る限り提案されていない。

本研究では, 知覚インテンシティ [3] に基づく計測波形の再合成を行うことによる疑似力覚提示を試みる。力の入れ具合が変化すると, 計測振動の振幅や周波数の情報に違いが現れ, 振動波形が複雑に変化する。このような高帯域の振動波形の変化は間接的に力情報の変化を含むと考えられる。筆者らのグループは高帯域の振動体感を再現する方法として, 知覚インテンシティに基づく高周波振動の感覚等価変換手法 Intensity Segment Modulation (ISM) [4] を提案し

ている。ISM は音響信号の触覚用信号への変換 [4] や, ツールの衝突感提示 [5] に有効であることが報告されている。本稿では ISM を疑似力覚提示に応用する。

本研究の目的は, 鉛筆筆記時の押し付け力変化時の微細な振動体感の変化を ISM により再現することで筆記動作の摩擦力を疑似的に提示できるか検証することである。荷重と速度を制御可能な筆記装置を製作し, 異なる法線力条件下での摩擦力と鉛筆を伝播する振動を同時刻で計測する。また, スタイラス触覚デバイスを用いて感じた摩擦力の順に振動を順位付けする被検者実験を行うことで, 高帯域の振動体感再現による疑似力覚提示の有効性を確認する。

2. 手法

2.1 Intensity Segment Modulation (ISM)

Intensity Segment Modulation (ISM) [4] は, 振動のインテンシティ知覚と包絡線検出特性という 2 つのヒトの知覚特性に着目し, 100 Hz 以上の高周波帯域の知覚量を維持したまま任意の周波数の振幅変調波に変調する手法である。入力波形を 5 ms のセグメント毎に分割し, セグメント毎に知覚インテンシティを算出することで, 100 Hz 以下の知覚インテンシティの変動を残すことができる。導出された知覚インテンシティは同じ知覚インテンシティを持つ固定周波数の振幅変調波に変換される。従来の振動提示では, バイブレータの高周波駆動時に可聴域のノイズが発生することや, バイブレータの応答限界により十分な刺激が与えられないといった問題があった。ISM では振動を任意のキャリア周波数の振幅変調波に変換するため, これらの問題を解決できる。本研究では, ISM 波形のキャリア周波数はヒ

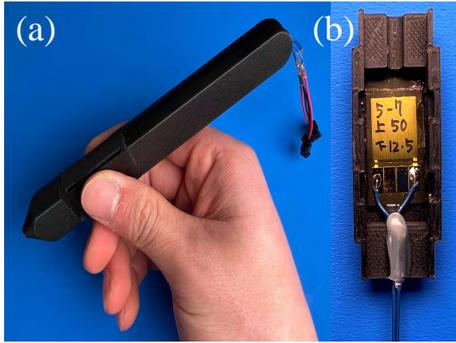


図 1: (a) Overview of the stylus device using PZT-MEMS and (b) PZT-MEMS attached to the back of the device[8].

トの知覚しやすい帯域である 200 Hz で固定した。

2.2 極薄 PZT-MEMS を用いたスタイラス触覚デバイス

本研究では、振動提示には極薄 PZT-MEMS[6] を搭載したスタイラス触覚デバイスを用いる。筆者らはこれまで PZT-MEMS に ISM を適用することで鉛筆硬度の筆記感の違いを表現できることを確認した [8]。本稿では PZT-MEMS を用いた疑似力覚提示を試みる。

PZT-MEMS は素子自体の厚さが $11\mu\text{m}$ 以下と世界最薄レベルの MEMS ピエゾ素子である [6]。デバイス筐体に貼り付けて使用する性質上省スペースであり、従来の触覚デバイスとは全く異なる新しい設計の触覚インタフェースを生み出す可能性がある。また、湾曲可能という性質は曲面をもつコントローラやスマートウォッチ等のウェアラブルデバイスとの相性が良い。一方、PZT-MEMS は薄膜であるため、駆動力が限られ、利用可能な周波数帯には制限がある。PZT-MEMS の周波数応答は、一般の Piezo 型アクチュエータと同様に、数百 Hz までフラットで触覚ディスプレイとして優れた特性をもつ [7]。ただし、周波数応答は貼り付けた筐体の共振特性の影響を受けるため、デバイスの設計に際しては筐体も含めた振動系を考慮する必要がある。

PZT-MEMS は筐体に貼り付けて使用するという特性を利用し、スタイラス触覚デバイスには裏側に MEMS が貼り付けられている (図 1)。スタイラスの全長は約 170 mm である。PZT-MEMS は貼り付けた筐体に直接変形を生成する特徴があるため、指先で把持する振動部の構造はシンプルな両持ち梁構造を採用している (図 2)。梁構造は両端固定の拘束条件となっている。振動部は縦半分に分かれる構造をしており、PZT-MEMS は合計で 2 枚使用する。振動はオーディオ信号として用意し、USB オーディオ (Steinberg, UR22mkII) を通じて Piezo アンプ (matsusada, PZDR series) で増幅させて PZT-MEMS に出力する。

このデバイスは、約 31 Vpp の交流電圧印加時に、700 Hz 付近までは $6.7\mu\text{m}$ 程度のフラットな振幅を出力し、1200 Hz 付近に振幅のピークをもつ周波数特性を有する [8]。

2.3 荷重・速度を制御可能な筆記計測装置

筆記時の荷重と速度を制御可能かつ振動と力覚情報を同時刻で計測可能な筆記装置を製作した (図 3)。

荷重は板金プレートを複数枚重ねて固定可能な治具とリ

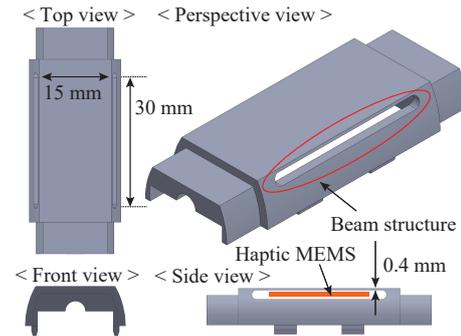


図 2: CAD drawing of vibration part and the beam structure[8].

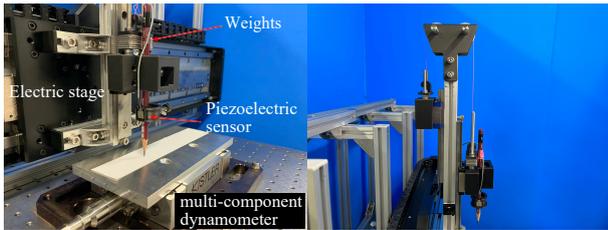
ニアガイドを用いて制御する。治具は 3D プリンタで製作され、クランプにより鉛筆の着脱が可能である。リニアガイドにより、鉛筆の摩擦やステージの微妙な傾きがあっても常に一定の荷重が鉛筆に加わる。さらに小さな荷重での筆記を実現するため、装置の反対側に同様の機構を取り付けカウンターウェイト機構を実装した。この機構により 0.3 – 3.5 N 程度の荷重を調整可能である。

筆記速度は低振動リニア電動ステージ (Zaber, X-LDQ-AE) で制御する。このリニア電動ステージはリニアモータを採用しており振動が発生しづらいため、筆記に由来しない振動の影響を抑えられる。このステージを用いて速度、移動距離等を同条件になるように制御した。

筆記時の振動は圧電式振動センサ (TOKIN, VS-VB203) を用いて計測する。このセンサは高い S/N 比をもち、かつ 20 Hz 以上 10 kHz 以下の周波数応答がほぼフラットな高応答性により、微小な高周波振動の測定に適している。実際は鉛筆にマウント可能なリング状のツールにセンサを貼り付けて計測する。計測の際は実際の筆記を想定し、鉛筆の先端から約 4 cm の位置にセンサが取り付けられた。

力覚情報は水晶式圧電センサを搭載し正確な力測定が可能な多成分動力計 (KISTLER, 9129AA) を用いて計測する。この動力計は 3 軸方向に 3 kHz 以上の共振周波数を持つため、鉛筆の筆記のように高周波が発生する測定にも適している。センサ上部をアルミプレートで拡張し、その上を鉛筆で筆記する。

この装置を用いて、法線力 0.3 N から 2.1 N まで 0.3 N 刻みの 7 条件で 3 回ずつ計測を行った。筆記具は HB の鉛筆、筆記対象は画用紙 (キャンソン社, ミタント紙) とし、電動ステージの設定は、速度 100 mm/s, ストローク 150 mm とした。摩擦力を計測した結果を図 4 に示す。横軸は法線力、縦軸が摩擦力を表している。各法線力条件の測定値をプロットし、原点がゼロを通るようにフィッティングした。本計測系がクーロン摩擦の法則に従うとすれば、動摩擦係数は直線の傾き 0.26 である。本装置で計測した鉛筆の筆記振動は 3. 章での被検者実験に使用する。



(a) Measuring part. (b) Counter weight.

図 3: The vibration and force sensing device that can control load and speed.

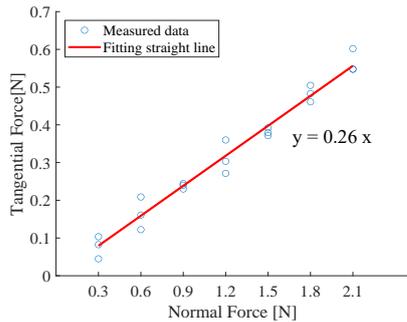


図 4: Normal force and tangential force.

3. 摩擦力提示実験

提案手法により疑似的に鉛筆筆記時の摩擦力を提示できるかを検証するため、振動から感じる摩擦力の大きさごとに順位づける被検者実験を行った。ISM 波形の提示に加え、比較のために生波形での提示も行った。

3.1 実験条件・手順

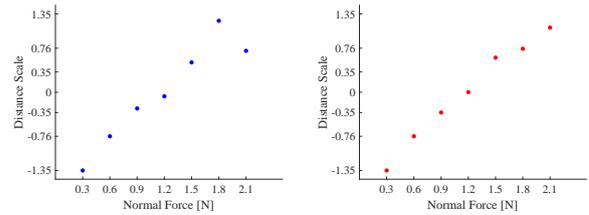
被検者は 20 代の健康な男性 5 名である。右利きが 4 名、左利きが 1 名で、利き手で実験を行った。法線力の条件は、0.3 N から 2.1 N まで 0.3 N 刻みの 7 条件である。2.3 節で法線力条件ごとに 3 回ずつ計測した振動の内、鉛筆の先端が折れることで生じるパルス波が最も少ない波形を選定した。振動刺激の条件は ISM 波形と生波形の 2 条件である。

実験手順を説明する。はじめに、法線力 7 条件に対応する振動ファイルを格納したプレイリストを VLC media player で作成する。被験者間の順序効果を回避するためにプレイリスト内の振動ファイルの順番はカウンターバランスをとって決定された。被験者はプレイリスト内の振動を順番に体験し、摩擦力が大きいと感じた順番に振動ファイルを並べ替えるよう指示された。被験者は振動を何度も再生でき、充分吟味してから順位を決定した。

生波形の条件の振動は PZT-MEMS の定格電圧を超えない最大ゲインとし、ISM 波形の条件の振動は被験者が摩擦力の違いを感じやすいゲインにあらかじめ調整した。

3.2 実験結果

品質の良さの順位は等距離ではなく近似的に正規分布に従う [9] ことを考慮し、摩擦力ごとの順位を正規化順位法 [9] により正規スコアに変換し平均をとった距離尺度のプロットを示す (図 5)。横軸は各法線力条件を示しており、縦軸



(a) Raw (b) ISM

図 5: Results of the ranking experiment.

は距離尺度を表している。1 位から 7 位までの正規スコアは、1 位 1.35, 2 位 0.76, 3 位 0.35, 4 位 0.00, 5 位 -0.35, 6 位 -0.76, 7 位 -1.35 である [9][10]。

ISM 波形、生波形ともに法線力 1.5 N 以下の条件は正しく順位付けできている。生波形では法線力 1.8 N の条件が最も距離尺度が大きく、法線力 2.1 N の条件との逆転が起こっている。ISM 波形ではすべての条件を正しく順位付けできている傾向にあった。

3.3 考察

図 6, 図 7 に法線力 2.1 N 条件での振動と摩擦力の計測波形と周波数スペクトルを示す。60–100 Hz の振動は筆記に伴う鉛筆のたわみが戻る弾性力による振動と考えられる。法線力に比例して鉛筆のたわみが大きくなることで振幅が増加する傾向にあったため、生波形でもある程度の正答率を得られたと考えられる。また 500 Hz 付近と数 kHz の周波数にも強いスペクトルが観察された。生波形では薄膜 PZT-MEMS の周波数応答の限界により高周波の触感を再現できず、法線力が大きい条件の違いが分かりにくかったと考えられる。ISM は高周波を知覚強度を保ったまま任意のキャリア周波数の AM 波に変換するため、周波数応答の問題を解決できる。そのため法線力が大きい条件のわずかな摩擦感の違いを表現でき、正しい順位をつけることができたと考えられる。

また多くの被検者から、「生波形では法線力 0.3 N と 0.6 N の振動がほとんど感じられず、それらの順位は触感ではなく振動しているかしていないかで決定していた」との意見が寄せられた。本実験では生波形の提示条件では薄膜 PZT-MEMS の定格電圧 (最大 40 V) の限界を超えないよう、法線力 7 条件のうち振幅が大きい条件にゲインを合わせた。生波形では法線力 0.3 N と 0.6 N の振動が小さくなってしまい、実質 0.9 N から 2.1 N までの 5 択の課題になり、被験者がより容易に回答できた可能性がある。ISM 波形ではそのような現象が起こらなかった。元波形の高周波は振幅が大きくても、知覚インテンシティとしては小さい場合がある。そのため本実験においては、ISM 波形は元波形よりも全体的な振幅が大きくなり、幅広い摩擦力に対応する振動を PZT-MEMS の定格電圧範囲内で出力することができた。

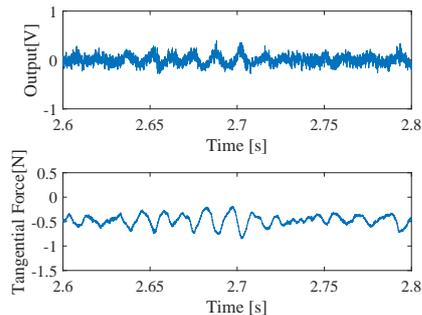


図 6: Waveforms (upper row) and tangential force(lower row) at normal force of 2.1 N.

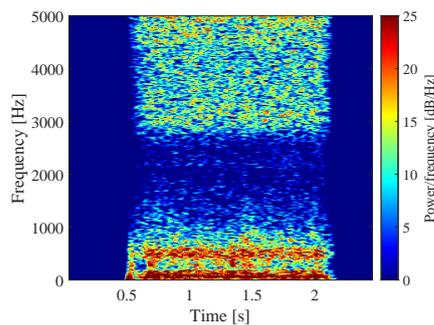


図 7: Frequency spectrum at normal force of 2.1 N.

4. 結言

本研究では、高周波振動を含む高帯域の振動体感を再現する Intensity Segment Modulation(ISM) を鉛筆筆記時の振動に適用することで繊細な摩擦感の変化を提示し、それが疑似的な力覚としても解釈可能であり、摩擦力の大きさを判別できることを確認した。

荷重と速度を制御可能かつ振動と力覚情報を同時刻で計測可能な筆記装置を製作した。荷重を調整することで摩擦力が線形に大きくなる振動データを収集した。これらの計測波形に ISM を適用し、摩擦力の大きさ毎に被験者に順位付けさせた結果、摩擦力の違いを感じられることを確認した。

今後は Culbertson らの手法 [11] のように、なぞり動作時の速度と法線力に対応する波形の知覚インテンシティを事前にデータベースに格納することで、触運動に応じた波形の自動生成を行う予定である。

謝辞

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務 (JPNP21004) の結果得られたものである。

参考文献

- [1] M. Konyo et al., "Alternative Display of Friction Represented by Tactile Stimulation without Tangential Force," EUROHAPTICS 2008, pp. 619-629, 2008
- [2] 岡本 正吾, 昆陽 雅司, 田所 諭, "1A1-D08 指腹への振動触刺激による力覚の誘発," ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 2010
- [3] Bensmaïa, S., Hollins, M. and Yau, J.: Vibrotactile intensity and frequency information in the Pacinian system: A psychophysical model, Perception Psychophysics, Vol. 67, No. 5, pp. 828-841 (2005).
- [4] K. Yamaguchi, M. Konyo and S. Tadokoro, "Sensory Equivalence Conversion of High-Frequency Vibrotactile Signals using Intensity Segment Modulation Method for Enhancing Audiovisual Experience," 2021 IEEE World Haptics Conference (WHC), Montreal, QC, Canada, 2021, pp. 674-679, doi: 10.1109/WHC49131.2021.9517147.
- [5] K. Yamaguchi, M. Waga, M. Konyo, and S. Tadokoro, "Improvement of Discrimination of Haptic Motion Experience by Reproducing Multi-point Spatial Distribution of Propagated Vibrations at the Wrist," Asia Haptics 2022, 2022
- [6] T. Takeshita et al., "Development of Flexible Haptic Device Based on Ultra-Thin PZT/Silicon Vibrator Array," 2021 IEEE 34th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), Gainesville, FL, USA, 2021, pp. 127-130, doi: 10.1109/MEMS51782.2021.9375280.
- [7] T. Takeshita, T.-V. Nguyen, Z. Daniel, Y. Takei, and T. Kobayashi, "Mechanical characteristics of laminated film vibrator using an ultra-thin MEMS actuator," Journal of Micromechanics and Microengineering, vol.32, no.10, p.105001,2022-8
- [8] 和賀正宗ら, "極薄 PZT-MEMS 振動子を用いた高周波振動感覚等価変換による鉛筆硬度の異なる筆記感の表現," ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 2023
- [9] 佐藤信, "官能検査入門", pp74-76, 日科技連出版社, 東京, 1978
- [10] H. L. HARTER, "Expected values of normal order statistics," Biometrika, vol.48, pp.151-165, 1961-6
- [11] H. Culbertson, J. Unwin, and K. J. Kuchenbecker, "Modeling and Rendering Realistic Textures from Unconstrained Tool Surface Interactions," IEEE Transactions on Haptics, vol.7, no.3, pp.381-393, 2014