

振動刺激を用いた疑似力覚の呈示

Representation of Pseudo Force Sensations Induced by Vibrotactile Stimuli

昆陽雅司¹⁾, 岡本正吾²⁾

Masashi KONYO and Shogo OKAMOTO

1) 東北大学 大学院情報科学研究科

(〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01, konyo@rm.is.tohoku.ac.jp)

2) 名古屋大学 大学院工学研究科

(〒 464-8603 名古屋市千種区不老町, okamoto-shogo@mech.nagoya-u.ac.jp)

Abstract : Force feedback has a definite potential to enhance usability and reality of information and communication technologies. However, force-feedback devices often face difficulty in portability and cost reduction. Pseudo force sensations generated by cutaneous stimuli can be a breakthrough to make a haptic technology much closer to our life because a tactile stimulator can be very compact and simple to use. This paper introduces our several studies on the generation of pseudo-force sensations like senses of friction, mass, and viscosity by only using single-DOF vibrotactile stimulation. Our proposed methods can apply for a haptic interface on mobile information devices.

Key Words: Pseudo Force Sensation, Vibrotactile Stimuli, Haptic Interfaces

1. はじめに

従来の情報通信において、触力覚メディアが普及してこなかった一因として、触力覚呈示ハードウェアの普及とコンテンツの不足の問題がある。力覚ディスプレイは、直感的な物体操作が可能など応用例は十分あるが、機構が複雑・大型であり、コストも高いため、未だ一般家庭に普及する気配はない。一方、皮膚感覚を刺激する触覚ディスプレイは、皮膚だけに刺激を加えるため、力覚ディスプレイに比べ小型軽量化が可能である。しかし、いわゆる「つるつる・ざらざら」といった、これまで触覚ディスプレイが対象としてきた手触りの呈示では、実用的なコンテンツが乏しく、普及が進んでいない。

そこで、本研究では触力覚メディア普及のブレークスルーを引き起こす基盤技術として、皮膚刺激によって疑似的に力覚を呈示する技術を提案している。これにより、どこでも手軽に触力覚情報を呈示することを目指している。

本稿では、筆者らが開発してきた摩擦感 [1] と慣性感・粘性感 [2] の疑似力覚呈示について紹介する。

2. 振動刺激を用いた摩擦感の呈示

2.1 コンセプト

摩擦感は、従来、力覚ディスプレイによって摩擦力を直接を提示する方法や、スクイズ膜を用いて摩擦力を低減させる方法などによって呈示されてきた。しかし、接線力を制御する装置は大型なものが多く、携帯電話やマウスへの搭載を考慮した場合、より小型な装置が求められる。また力覚ディスプレイだけでは、皮膚感覚が再現されないの違和感があることが多い。本研究では、力覚ではなく、振動による皮膚感覚のみで摩擦感を呈示する方法を提案してい

る [1]。具体的には、物体との接触の際に生じる Stick-Slip 運動による触覚受容器活動を高周波振動によって再現することで、摩擦感を呈示する。

Stick-Slip 運動とは、固体同士がすべりあうときに、固着 (Stick) と滑り (Slip) が交互に現れる振動現象であり、固体のバネ要素と静止摩擦力と動摩擦力の違いが主な要因である。筆者らは、ヒト指とアクリル板との接触の際に起こる Stick-Slip 運動を高速度カメラによって測定した結果、1) 最大 100 Hz 程度の高周波現象であること、2) 固着に伴う皮膚変形は全体で同期して起こることを確認した。この結果より、Stick-Slip 運動を検出する触覚受容器として、高速に応答し、受容野の広い FA II の関与が妥当だと考えられる。

そこで、固着から滑りへ遷移時に FA II を選択的に刺激する 300 Hz 以上の高周波振動を生成することによって摩擦感を呈示する方法を提案した。刺激法のコンセプトを図 1 に示す。本手法では、固着期に蓄えられたひずみエネルギーが滑り遷移時に解放されて高周波の皮膚変動を引き起こすと考え、固着-滑り遷移時に高周波振動を生成する。振動振幅は滑り遷移時直後に時間遅れを伴うピーク値をもち、徐々に減衰するものとした。最大振幅 A_t は固着期間 d_t に比例して増加する。ここで、振動刺激の周波数は 100 Hz 程度の Stick-Slip 運動の周期に対して十分に高周波の刺激を用いる。

2.2 Stick-Slip 運動近似モデル

Stick-Slip 運動を疑似的に再現するために、図 2 に示すようなクーロン摩擦を伴う 1 自由度振動系モデルを用いる。このモデルでは物体に接触している指腹部表面のせん断方向の動特性は、並列に並べたばね定数 k のばね要素と粘性減衰係数 c の粘性要素に接続されている質量 m の物体の振動

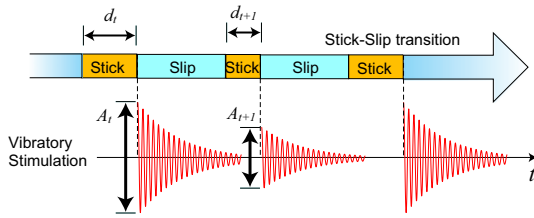


図 1: Stic-Slip 運動に基づく摩擦感呈示法のコンセプト

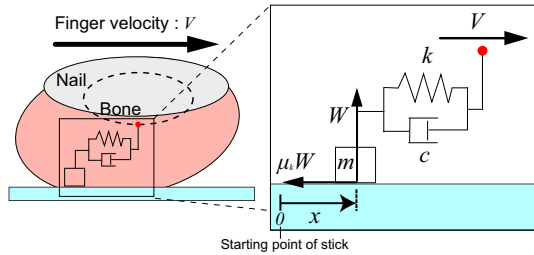


図 2: Stick-Slip 運動近似モデル

系で近似され、速度 V の触対象物と垂直荷重 W で接触し、摩擦力 F の作用を受ける。このモデルにより、静止摩擦係数と動摩擦係数の差によって固着-滑りが起こること、触速度の変化に伴って Stick-Slip 周波数が遷移すること、押付力が大きくなると固着-滑りが起こりやすくなることなどの特徴が再現される。パラメータ同定に関しては、観測された Stick-Slip 運動の周波数と発生率が再現されるように設定する。

2.3 摩擦感の評価

図 3 に示すように力覚提示装置 PHANToM に振動子を装着し、皮膚感覚のみによって得られる摩擦感と、力覚提示装置で直接摩擦力を提示した場合を比較した。振動子には樹脂モールドしたピエゾ素子を用いる。PHANToM では物体との接触の際に生じる法線力のみ呈示し、接線力（摩擦力）は一切呈示しない。被験者は図 3 に示すように振動子を示指と母指で把持して動かす。指先の速度と座標は PHANToM を通して取得し、この運動情報を Stick-Slip 運動近似モデルへ入力することで、Stick-Slip 遷移のタイミングと Stick 期間を求めることで振動子への印加電圧を制御した。また、力覚による摩擦感の呈示は、同様の固着・滑り近似モデルを用いて摩擦力を求め、PHANTOM を用いて指先に接線力として呈示した。

実験方法は、Stick-Slip 運動近似モデルの静止摩擦係数 μ_s 、静止摩擦係数と動摩擦係数の差 $\Delta\mu$ の 2 つの摩擦パラメータを変化させた際にヒトが感じる摩擦感の影響をマグニチュード推定法を用いて評価した。被験者は 10 人である。

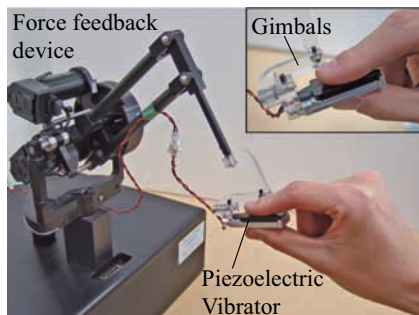


図 3: 摩擦感の評価実験装置

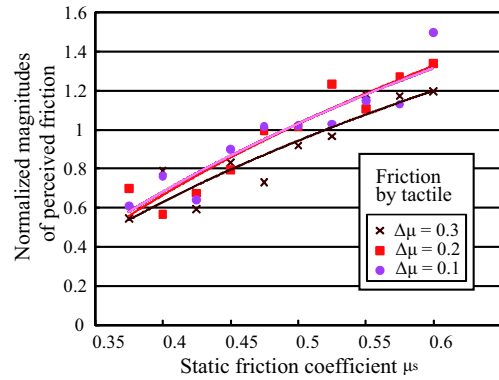


図 4: 皮膚刺激で得られた摩擦感の主観的強度

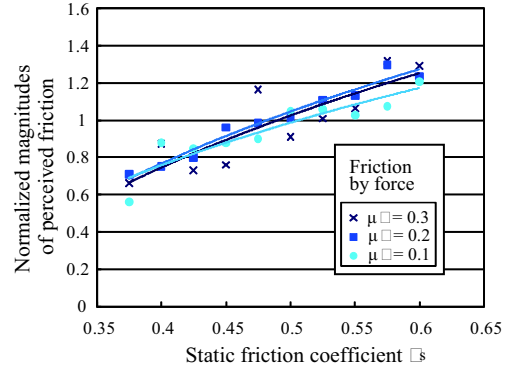


図 5: 力覚提示で得られた摩擦感の主観的強度

実験結果は各被験者ごとに正規化し、さらに全被験者の加重平均を求めた。図 4、図 5 に 2 つの実験で回答された数値を実験ごとに個別に正規化した結果を示す。両者を比較すると、どちらの場合も静止摩擦係数が増加するに伴って被験者が感じた摩擦感の大きさも増加しており、その増加傾向も類似している。各 $\Delta\mu$ について、皮膚刺激と力覚提示の間の心理尺度値の相関係数を求めると、0.794 ($\Delta\mu=0.3$)、0.950 ($\Delta\mu=0.2$)、0.884 ($\Delta\mu=0.1$) であり、強い相関があるといえる。このことから、今回提案した皮膚刺激による摩擦感呈示法により、力覚提示と同様の傾向をもつ摩擦感が呈示できたと考えられる。

一方、皮膚刺激と力覚提示の結果全体を正規化して、主観的強度を比較すると、皮膚刺激による摩擦感呈示は力覚提示による摩擦感呈示に比べ、被験者が感じた摩擦感の大きさが 1/7 程度であることが分かった。

3. 振動刺激を用いた慣性感・粘性の呈示

3.1 コンセプト

触覚受容器は、ヒトが物体を操作する際の物体の質量や摩擦などの力学特性の知覚に関与していると考えられる (e.g. [3], [4])。例えば、Minamizawa らはベルト状のデバイスで、皮膚に加える変形の大きさを動的に制御することで、仮想物体の力学特性を呈示することに成功している [5]。

そこで筆者らは、皮膚を実際に変形させる代わりに、振動刺激によって触覚受容器を刺激し、それによって力覚的な知覚を錯覚させることができないかと考えた。これまでに、運動中の手指の機械受容器を振動により刺激することが、操作対象の力学特性の知覚に影響することを確認している [6]。

本稿で紹介する研究では、操作する物体の質量や粘性が、

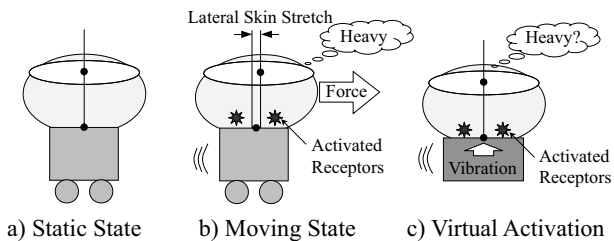


図 6: スキンストレッチによる力覚知覚と振動刺激による疑似再現

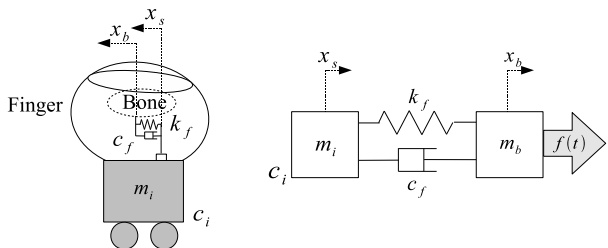


図 7: 機械パラメータが及ぼす皮膚変形のモデル化

皮膚に及ぼす変形（スキンストレッチ）の大きさとタイミングを、振動刺激で模擬することにより質量や粘性の錯覚を生じさせることができると考えた [2].

図 6 にこの概念図を示す。この例では、ヒトの指がある質量をもつ物体を左右に動かす様子を示している。a) 静止状態に比べ、b) 加速しながら動かす状態では、皮膚にせん断方向の変形が生じる。この動的な変形により、触覚受容器は活動するが、ヒトはこの触覚受容器の活動に基づき操作対象の力学特性を推定しているという仮説を立てた。そして、c) に示すように、この活動を運動に応じて動的に変化する振動刺激を用いて疑似的に再現することができれば、ヒトは実際のスキンストレッチがなくても力学特性を錯覚すると期待される。

3.2 刺激方法

図 7 に示すように、皮膚を弾性要素と粘性要素が並列に配置された Kelvin モデルで近似し、接続された操作対象の質量および粘性が、皮膚のせん断変形におよぼす影響について調査すると、次のような傾向があることがわかる。

まず、操作する物体の粘性が変化するとき、その影響によって起こる皮膚変形は、運動の速度とほぼ同期して変化が大きくなる。また、物体の質量が変化するとき、その影響によって起こる変形は、運動の加速度とほぼ同期して変化が大きくなる。ここで、皮膚に加える振動刺激の振幅に比例して、皮膚変形の大きさを錯覚させると仮定する。次式の正弦波を振動刺激として利用する。

$$y(t) = A(t) \sin(2\pi ft), \quad (1)$$

慣性の変化を錯覚させるための刺激は、次のようになる。

$$A(t) \propto |x(t)|. \quad (2)$$

また、粘性の変化を錯覚させるための刺激は、次のようになる。

$$A(t) \propto |\dot{x}(t)|. \quad (3)$$

なお、ここでは、振動振幅は指の速度や加速度に比例と仮定したが、この比例関係に最適性があるわけではない。

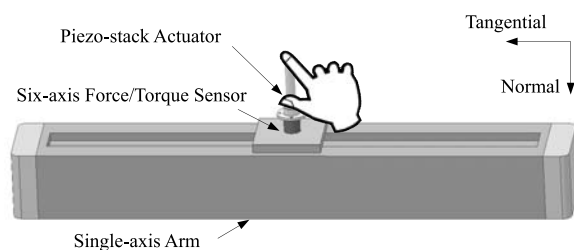


図 8: 機械インピーダンス錯覚検証のための実験装置

3.3 機械パラメータ錯覚の実証

前節の刺激法によって、粘性と質量の機械パラメータの変化の錯覚が起こるかどうかを実験によって検証した [2].

モダリティの違いから、振動刺激と力覚とを 1 対 1 で比較することは困難である。ここでは、実際に機械パラメータを制御可能な力覚呈示装置に、振動刺激を重畳して呈示することで、機械パラメータ知覚に影響を及ぼすことができるかを検証することとした。

図 8 に 1 軸アーム・力センサ・振動子からなる実験装置を示す。振動子は積層型圧電素子 (NEC トーキン, ASB510C801P0) を用いた。1 軸アーム (ヤマハ, MR12T) は、力センサ (BL オートテック, ThinNANO1.2/1) の出力をもとに、

$$F_x(t) = mx(t) + c\dot{x}(t) \quad (4)$$

に従い、インピーダンス制御される。被験者は、指先を振動子の上に置き、手を左右に運動させる。このときの手の速度・加速度に応じて、機械インピーダンスに応じた力が呈示されると共に、振動刺激が指先に呈示される。

実験手順

本稿では、紙面の都合から粘性知覚の実験の手順について説明する。質量の知覚についても同様の手順で行われた。被験者は、実験装置を指先で任意に動かし、それによって知覚される装置の粘性について、標準刺激と試験刺激を比較し、そらの大きさを回答する。

標準刺激は、一定の粘性係数で力覚を呈示し、運動に依らず一定の振幅の振動刺激を重畳させる。具体的には、機械パラメータを、 $c = 0.5 \text{ Ns/m}$, $m = 0.2 \text{ kg}$ とし、触覚刺激は、 $A(t) = 3.6 \mu\text{m}$, $f = 280 \text{ Hz}$ とした。

試験刺激は次の 3 グループ 6 種類の刺激を用いる。

グループ (i):

C+: 力覚の粘性増加。触覚刺激は標準刺激と同じ。

C-: 力覚の粘性減少。触覚刺激は標準刺激と同じ。

グループ (ii)

C+I_c+: 力覚の粘性増加。触覚刺激も粘性増加。

C-I_c-: 力覚の粘性減少。触覚刺激も粘性減少。

グループ (iii)

C+I_c-: 力覚の粘性増加。触覚刺激は逆に粘性減少。

C-I_c+: 力覚の粘性減少。触覚刺激は逆に粘性増加。

グループ (i) の刺激は、被験者が力覚の粘性の変化を検出できることを確認するために設けられている。また、グループ (ii) の刺激は、設計された触覚刺激が、知覚される力覚の粘性の変化を大きくすることを確認するために設けた。さらに、グループ (iii) の刺激は、触覚刺激が、力覚の

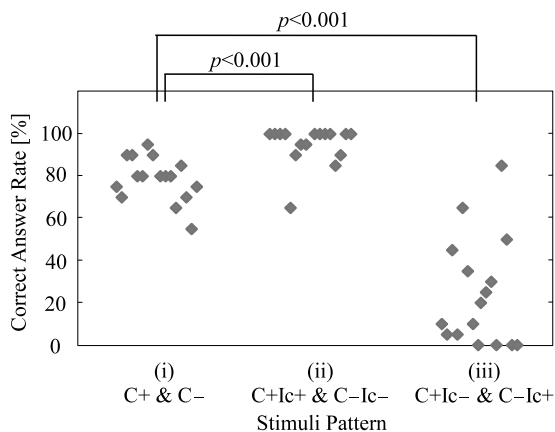


図9: 振動刺激が粘性感の正答率に及ぼした影響

粘性の知覚を妨げる、もしくは力覚による知覚よりも優位に影響することを確かめるために設けられた。

粘性の錯覚を生じさせるための、振動刺激の振幅は

$$\begin{cases} A(t) = \alpha_v & \text{if } \dot{x}(t) < B_v \\ A(t) = \alpha_v \left(1 - \frac{\dot{x}(t) - B_v}{D_v}\right) & \text{if } \dot{x}(t) \geq B_v \end{cases} \quad (5)$$

に従う。ここで、 α_v 、 B_v と D_v はそれぞれ、指が静止時の振動刺激の振幅、不感帯の幅、振動振幅の変化率である ($\alpha_v = 3.6 \mu\text{m}$, $B_v = 40 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$, $D_v = 120 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$)。 (5) 中の $\dot{x}(t)$ は、試験刺激が I_{c+} のときは + であり、 I_{c-} のときは - になる。

なお、標準刺激と試験刺激の機械パラメータの差が大きすぎると、力覚の影響が大きくなり、振動による錯覚の効果を評価することができなくなる。本実験では、予備実験を行い、調度検出が可能な程度の機械パラメータの変化を極限法にて決定することとした。決定された粘性係数は、粘性を増加させる場合、 $c = 0.60\text{--}0.76 \text{ Ns/m}$ 、粘性を減少させる場合、 $c = 0.18\text{--}0.34 \text{ Ns/m}$ とした。

実験では、まず、標準刺激が呈示され、次に試験刺激が呈示された。その後、参加者らは標準刺激に比べて、試験刺激の粘性が増加したか、減少したかを回答した。試験刺激として、6種類の試験刺激のうち1つがランダムに呈示された。それぞれの種類は、合計20回呈示された。被験者の数は8名である。

実験結果

Fig. 9 に粘性に関する実験結果を示す。正答率は、粘性の増減を正しく回答した割合を意味する。

まず、グループ (i) の結果をみると、正答率がチャンスレベル (0.5) よりも大きい (t -test, $t_0(15) = 10.70$, $p < 0.001$, two-tailed) ことから、被験者は粘性の変化を正しく検知できることが確認される。

次に、グループ (i) と (ii) の正答率の差に着目すると、グループ (ii) の正答率が (i) のそれよりも大きい (Steel-Dwass test, $q_0(3, \infty) = 3.96$, $p < 0.001$) ことから、錯覚刺激が知覚される粘性の変化を大きくしたことがわかる。

最後に、グループ (i) と (iii) の正答率の差に着目する。グループ (iii) の解答率が (i) のそれよりも小さい (Steel-Dwass test, $p_0(3, \infty) = 4.35$, $p < 0.001$) ことから、錯覚刺激が知覚される粘性の変化を打ち消したことを意味する。さらに、グループ (iii) の正答率は、チャンスレベルよりも小さい (t -test, $t_0(15) = 3.87$, $p < 0.001$) ことから、錯覚刺激

が、本物の粘性刺激よりも優位に参加者らの知覚に影響したことがわかる。

以上の結果・解析より、インピーダンス制御された一軸アームの知覚される粘性は、開発された錯覚刺激により増減されることが確認された。計算方法の詳細は割愛するが、実験で用いられた錯覚刺激の主観的效果はおおよそ 0.35 Ns/m に相当することが実験結果よりわかる。なお、実験の結果には、個人差が認められた。8名の参加者のうち、1名は錯覚刺激の効果が見られなかった。

また、質量の錯覚に関しても粘性の場合と同様に、期待した結果が得られたが、紙面の都合で省略する。

4. まとめ

本稿では、筆者らが開発してきた摩擦感と慣性感・粘性感の疑似力覚呈示について紹介した。これらの技術は、小型の振動子で力覚のような呈示できるため、携帯情報端末などへの搭載が期待できる。現在、筆者らは、ポインティングスティックに振動子を搭載することで、画面中のオブジェクトとの触力覚インタラクションが可能な技術 Vib-Touch[7, 8] を開発している。これにより、GUI のユーザビリティサポートや、インタラクティブなコンテンツなど、従来の触覚ディスプレイにない様々な応用が期待される。

謝辞

本研究の一部は総務省 SCOPE (#082102006) および科研費 (#21686024) の支援を受けて行われました。

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, 昆陽ら, 指腹への振動触刺激による力覚の誘発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2010 講演論文集, 1A1-D08, 2010.
- [3] R. S. Johansson et al., Roles of glabrous skin receptors and sensorimotor memory in automatic control of precision grip when lifting rougher or more slippery objects, Experimental Brain Research, vol. 56, no. 3, pp. 550-564, 1984.
- [4] P. Jenmalm et al., Visual and Tactile Information About Object-Curvature Control Fingertip Forces and Grasp Kinematics in Human Dexterous Manipulation, J. of Neurophysiology, pp. 2984-2997, vol. 84, 2000.
- [5] K. Minamizawa et al., Wearable Haptic Display to Present Gravity Sensation, Proc. of the WHC'07, pp. 133-138, 2007.
- [6] S. Okamoto, M. Konyo et al., Detectability and Perceptual Consequences of Delayed Feedback in a Vibrotactile Texture Display, IEEE Transactions on Haptics, vol. 2, issue 2, pp. 73-84, 2009.
- [7] S. Tsuchiya, M. Konyo, et al., Vib-Touch: Virtual Active Touch Interface for Handheld Devices, IEEE RO-MAN2009, pp.12-17, 2009.
- [8] 樋口, 昆陽ら, Vib-Touch:仮想能動触を利用した直感的操作, 第15回日本バーチャルリアリティ学会大会技術展示, 2010 (発表予定) .