

解説

振動刺激を用いた疑似力覚提示

Pseudo Haptic Representations Using Vibrotactile Stimuli

昆陽 雅司*¹ 岡本 正吾*² *¹東北大学 *²名古屋大学

Masashi Konyo*¹ and Shogo Okamoto*² *¹Tohoku University *²Nagoya University

1. はじめに

振動刺激は、携帯電話やゲーム機のバイブレータなどで利用されているように、最も手軽に利用できる触覚刺激の1つである。最近では、スマートフォンのタッチパネルの操作やクリック感のフィードバック刺激として利用されることも多い。振動を発生するアクチュエータ[1]は、偏芯モータ、ボイスコイル、圧電アクチュエータ、高分子アクチュエータなど多種に及ぶが、触覚ディスプレイ用に商用利用されているものも多く、1自由度の振動刺激であれば、実装は容易である。

それでは、この振動刺激だけで、どこまで多様な触覚情報を提示することが可能だろうか。これまでの研究を俯瞰すると、1自由度の機械的振動刺激で提示される情報には、1) 記号的情報、2) 手触りなどの触感情報、3) 疑似的な力覚、の3つの潮流があるといえる。

本稿では、まず、この3つの潮流を整理するために、各項目の概要とヒトの触覚受容機構のプロセスとの関係について述べる。そして、近年、筆者らが特に着目している第3の潮流、疑似力覚提示を中心に解説する。皮膚の力学的変形プロセスに着目することで、摩擦感や、慣性・粘性感といった従来の振動刺激では考えられなかった情報を提示できることを紹介する。

2. 触覚受容プロセスと振動刺激の関係

触覚(皮膚感覚)の受容プロセスは、図1に示すように、(I) 触対象の物理特性が (II) 皮膚の変形に置き換わり (III) その変形ともなう力学量を触覚受容器が取得し (IV) 中枢神経系で処理された結果 (V) 知覚・認知される。また、触対象と皮膚との境界の物理現象は、能動的に行う触察運動によって引き起こされる[2]。

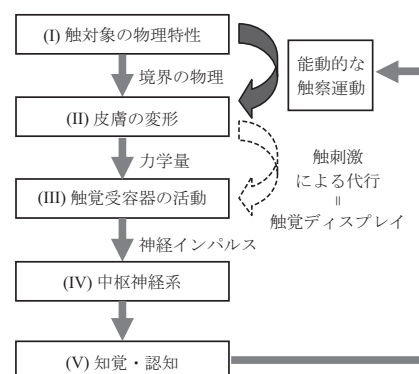


図1 触覚の受容プロセス

振動刺激は、この触覚受容プロセスでは (II) 皮膚の変形を強制的に起こす代行刺激である。しかし、前節で述べた3つの潮流を俯瞰すると、着目している受容プロセスに違いが見られる。

まず、1つ目の記号的情報は、振動波形や周期などの違いにより振動パターンを生成するもので、直感的な意味よりも記号的な区別可能性を扱うものが多い[3][4]。この場合、受容プロセスは特に意識されておらず、振動刺激と (V) 知覚・認知の関係を直接調査しているといえる。

2つ目の触感情報は、布などの素材感、テクスチャ感を提示するものである。このような複雑な触感では、表面の粗さ、硬軟、摩擦(乾湿)、など複数の触感因子から構成される[5]。筆者らは、図1の (III) 触覚受容器の活動に着目することで、実際の皮膚変形とは異なる振動刺激を与えて触感を合成する手法を提案している。これは、触覚受容器の周波数応答特性の違いを利用して、振動周波数の帯域の違いにより、触覚受容器を選択的に刺激し、その活動量を個別に制御することで、複雑な触感を合成する手法である。例えば、5 Hz 以下の低周波帯では SA I 型受容器を、200 Hz 程度以上では FA II 型受容器を刺激することができる。これまでに布のような手触りの合成[6][7]や、マスタ・スレーブシステムによる実時間の触感伝達[8][9]などに成功している。詳細は、文献[2]で詳しく述べているので参照されたい。

3つ目の疑似力覚は、一般に、皮膚のせん断刺激や振動刺

原稿受付

キーワード: Vibrotactile Stimuli, Pseudo Haptics, Tactile Display, Tactile Characteristics

*¹仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01

*²名古屋市千種区不老町

*¹6-6-01 Aramaki-aza-aoba, Aoba-ku, Sendai

*²Chikusa-ku, Nagoya-shi

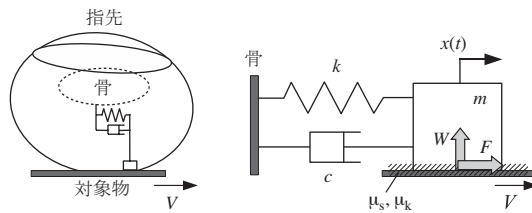


図2 Stick-Slip 運動近似モデル

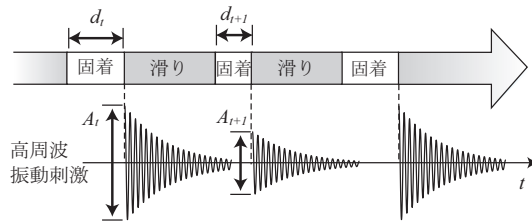


図3 Stic-Slip 遷移に基づく摩擦感呈示法のコンセプト

激によって、疑似的な力覚情報を提示する手法である。疑似力覚は力の大きさや方向だけでなく、衝突時の高周波の振動現象を再現することで、衝突対象の剛性を提示することも可能である [11]。このようなアプローチは、大型の力覚フィードバックデバイスが不要であるため、携帯情報端末や装着型インタフェースへの応用が期待されている [10]。

筆者らは、皮膚刺激による疑似力覚提示のためには、受容プロセスにおける (I) 触対象の物理特性が (II) 皮膚の変形に置き換わる境界の物理の再現が重要であると考えている。なぜなら、触覚と力覚は本来同時に起こる知覚現象であり、触覚も皮膚変形により力学情報をコーディングしている可能性が高いからである。例えば、人が物体を持ち上げたり、揺すったりする際、その物体の質量による慣性力は深部感覚として、筋や腱に存在する自己受容感覚によって知覚されると同時に、皮膚も変形させ触覚受容器を活動させる。このような力学現象と皮膚変形の詳細にモデリングすることが、疑似力覚提示を実現するための第1のステップである。第2のステップは、皮膚変形と触覚受容器の活動の関係を、代替刺激によって再現することである。これは、上述した (III) の触覚受容器活動のプロセスの再現であり、振動刺激を用いた選択的刺激法が利用できる。

次節から、筆者らが取り組んできた振動刺激を用いた摩擦感と、慣性・粘性感の疑似力覚提示について紹介する。

3. 振動刺激を用いた摩擦感の提示

筆者らは、摩擦時の皮膚の動的な振動現象に着目し、力学モデルによって固着-滑り振動を近似的に再現し、振動刺激によって摩擦感を提示することに成功している [12]。

固着-滑り振動とは、物体同士がすべりあうときに、固着と滑りが交互に現れる振動現象であり、物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、

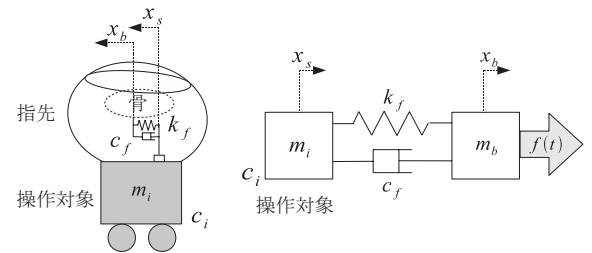


図4 機械パラメータに基づく皮膚変形モデル

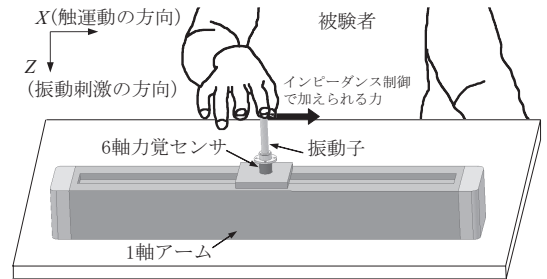


図5 慣性・粘性感提示の実証実験

ヒト指とアクリル板との接触の際に起こる固着-滑り振動を高速度カメラによって測定し、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によって、固着-滑り振動を再現した。このモデルにより、触速度 V や押荷力 W の変化に伴う、固着-滑り周波数が遷移などの特徴が近似できるようになった。

振動刺激の生成に関しては、固着-滑り振動が、接触面全体で、最大数百 Hz 程度の高周波で起こることから、高速にตอบสนองし、受容野の広い FA II 型受容器の関与を仮定し、400Hz 程度の高周波振動で選択的に刺激を加える。刺激法のコンセプトを図3に示す。本手法では、固着期に蓄えられたひずみが滑り遷移時に解放されることで触覚受容器が急激に活動すると考え、振幅を滑り遷移時に増加させ、その後、徐々に減衰させることとした。振幅 A は、固着期間 d が長いほど、ひずみが大きくなると考え、固着期間に比例して大きくする。

この手法によって提示された摩擦感の定量的な評価に関しては割愛するが、力覚提示装置の把持部に、骨伝導スピーカを用いた振動子を取り付けて、実際の力を発生せずに振動刺激だけで摩擦感を提示した場合と、従来の摩擦力を実際に提示した場合の、摩擦感の主観的強度を比較したところ、振動刺激による摩擦感の方が主観的強度が小さいものの、両者は同様の傾向を示すことが確認された [12]。

4. 振動刺激を用いた慣性・粘性感の提示

皮膚感覚は、触対象の慣性、粘性などの機械パラメータの取得にも関与すると考えられる。なぜなら、皮膚が接触する物体を揺すったり、振り回した際には、物体に加わる慣性力や粘性力に従って、皮膚が変形し、触覚受容器が活

動するからである．この考えに基づき，筆者らは，物体を指先で操作している際に，振動刺激を加えることによって，操作物体の慣性・粘性の錯覚が生じることを実験的に示した [13] [14] ．

このような疑似力覚提示を実現するには，慣性・粘性の機械パラメータと皮膚変形の間関係を調べる必要がある．今，ヒトの指が，摩擦のない物体を動かすと考え，Fig. 4 のような，1 自由度の皮膚変形モデルを考える．皮膚と物体は固着しており，滑りはないものとする．物体は，機械パラメータとして質量 (m_i) と粘性 (c_i) を有する．運動方程式を立て，物体の機械パラメータが皮膚変形に及ぼす影響を調べると，粘性の変化による皮膚変形の差は，指の速度とほぼ同位相であり，慣性の変化による皮膚変形の差は，指の加速度とほぼ同位相であることがわかる [14] ．

そこで，上記の調査結果を簡略化して刺激法を検討すると，物体の粘性が大きくと錯覚させる場合は，速度に比例して触覚受容器を強く刺激し，物体の慣性が大きくと錯覚させる場合は，加速度に比例して触覚受容器を強く刺激すればよいと考えられる．

触覚受容器の活動の制御には，振動刺激を用いた選択的刺激法の考えに従い，FA II 型受容器を対象として，一定周期 (280 Hz) の振動刺激の振幅により制御する．

この手法の有効性を実証するために，図 5 に示すような 1 軸アームをインピーダンス制御し，本物の機械インピーダンスに対して，提案する振動刺激がどのように作用するかを検証した．詳細は文献 [14] を参照されたいが，提案する振動刺激によって，知覚された機械インピーダンスに強いバイアス効果が起こることが実証された．これにより設計された振動刺激により質量や粘性の知覚を増減できることが確認された．

5. おわりに

振動刺激に対する触覚受容プロセスと触覚情報の関係について述べ，単純な振動刺激であっても，触対象と皮膚の境界の力学現象を理解することで，多様な触力覚が提示可能になることを紹介した．提案した疑似力覚提示手法は，携帯型情報端末への応用を進めている [15] ~ [17] ．今後，携帯型情報端末におけるインタラクティブなコンテンツの実現だけでなく，装着型デバイスによる運動の教示や，リハビリテーションなど多様な応用が期待される．

参考文献

- [1] 山本晃生: “アクチュエータ技術と触覚インタフェース”, 計測と制御, vol. 47, no. 7, pp. 578-581, 2008.
- [2] 下条誠, 前野隆司, 篠田裕之, 佐野明人 編: “触覚認識メカニズムと応用技術 - 触覚センサ・触覚ディスプレイ”, サイエンス&テクノロジー, 2010.
- [3] J. Luk, J. Pasquero, S. Little, and K. MacLean: “A role for haptics in mobile interaction: initial design using a handheld

tactile display prototype,” Proc. of SIGCHI CHI 2006.

- [4] H. Chen, J. Park, S. Dai, and H. Z. Tan: “Design and Evaluation of Identifiable Key-click Signals for Mobile Devices,” IEEE Trans. on Haptics, vol. 4, no. 4, 2011.
- [5] 永野光, 岡本正吾, 山田陽滋: “触覚的テクスチャの材質感次元構成に関する研究動向”, 日本バーチャルリアリティ学会誌, vol. 12, no. 3, pp. 343-353, 2011.
- [6] 昆陽雅司, 田所諭, 高森年, 小黒啓介, 徳田献一: “高分子ゲルアクチュエータを用いた布の手触り感覚を呈示する触覚ディスプレイ”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol. 6, no. 4, pp. 323-328, 2001.
- [7] M. Konyo, A. Yoshida, S. Tadokoro, et al.: “A tactile synthesis method using multiple frequency vibration for representing virtual touch,” Proc. IEEE/RJS IROS2005, pp. 1121-1127, 2005.
- [8] T. Yamauchi, S. Okamoto, M. Konyo, et al.: “Real-time Remote Transmission of Multiple Tactile Properties through Master-Slave Robot System,” Proc. IEEE ICRA, pp. 1753-1760, 2010.
- [9] S. Okamoto, M. Konyo, et al.: “Remote Tactile Transmission with Time Delay for Robotic Master-Slave Systems,” Advanced Robotics, vol. 25, no. 9-10, pp. 1271-1294, 2011.
- [10] 黒田嘉宏, 仲谷正史, 長谷川晶一, 藤田欣也: “物理的刺激に基づく疑似力覚の提示と計算に関する研究動向”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol. 16, no. 3, pp. 379-390, 2011.
- [11] A.M. Okamura, et al.: “Reality-based models for vibration feedback in virtual environments,” IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, vol. 6, no. 3, pp. 245-252, 2001.
- [12] M. Konyo, H. Yamada, S. Okamoto, S. Tadokoro: “Alternative Display of Friction Represented by Tactile Stimulation without Tangential Force,” Proc. EuroHaptics 2008, pp. 619-629, 2008.
- [13] S. Okamoto, M. Konyo, S. Saga, and S. Tadokoro: “Detectability and Perceptual Consequences of Delayed Feedback in a Vibrotactile Texture Display,” IEEE Trans. on Haptics, vol. 2, no. 2, pp. 73-84, 2009.
- [14] S. Okamoto, M. Konyo, and S. Tadokoro: “Vibrotactile Stimuli Applied to Finger Pads as Biases for Perceived Inertial and Viscous Loads,” IEEE Trans. on Haptics, vol. 4, no. 4, vol.4, pp. 307-315, 2011.
- [15] S. Tsuchiya, M. Konyo, H. Yamada, T. Yamauchi, S. Okamoto, and S. Tadokoro: “Virtual Active Touch II: Vibrotactile Representation of Friction and a New Approach to Surface Shape Display,” Proc. IEEE/RJS IROS2009, pp.3184-3189, 2009.
- [16] S. Tsuchiya, M. Konyo, H. Yamada, T. Yamauchi, S. Okamoto, S. Tadokoro: “Vib-Touch: Virtual Active Touch Interface for Handheld Devices,” Proc. IEEE RO-MAN2009, pp.12-17, 2009.
- [17] S. Okamoto, T. Yamauchi, M. Konyo, and S. Tadokoro: “Virtual Active Touch: Perception of Virtual Gratings Wavelength through Pointing-Stick Interface,” IEEE Trans. on Haptics, vol. 5, no 1, pp. 85-93, 2012.

昆陽雅司 (Masashi Konyo)

2004 年神戸大学院自然科学研究科修了．2004 年慶應義塾大学大学院理工学研究科 COE 特別助手．2005 年東北大学大学院情報科学研究科助手，2009 年同研究科准教授，現在に至る．ハプティクス，ニューアクチュエータ，レスキューロボットなどの研究に従事．博士 (工学) ．
(日本ロボット学会正会員)

岡本正吾 (Shogo Okamoto)

2010 年 東北大学 大学院情報科学研究科 博士課程後期 3 年の課程修了．同年より，名古屋大学 大学院工学研究科機械理工学専攻 助教．ハプティクスの研究に従事．博士 (情報科学) ．
(日本ロボット学会正会員)