



# ピンチング型触覚ディスプレイを用いた粗滑感提示

## Pinching-Type Tactile Display for Roughness Perception

清水真陽<sup>1)</sup>, 黒川朝陽<sup>1)</sup>, 安藤潤人<sup>1)</sup>, 野間春生<sup>1)</sup>

Masaharu SHIMIZU, Asahi KUROKAWA, Mitsuhiro ANDO, and Haruo NOMA

1) 立命館大学 (〒567-8570 大阪府茨木市岩倉町 2-150, mshimizu@mxdlab.net)

**概要:** ヒトは紙や布等の質感を評価する際、表面の粗滑感を捉えるために、複数指でつまみ擦るピンチング動作を行い、指先間で生じる微細な振動や摩擦を統合的に知覚する。このような探索により、単一指での接触よりも豊かな触覚認知が得られる。本研究では、ピンチング時に指先が知覚する粗滑感を含む質感の再現を目指し、動作速度に応じて広帯域の振動を提示可能なピンチング型触覚ディスプレイを開発した。評価実験の結果、空間周波数 0.4~1.2(cycles/deg) の凹凸形状を有する仮想物体表面の粗滑感を提示可能であることを示した。

**キーワード:** 触覚, 触覚ディスプレイ, アクチュエータ

### 1. はじめに

触覚は、視覚や聴覚では捉えにくい微細な凹凸や質感、力加減の調整を可能にし、人間の判断や経験に直結する感覚である。これを再現・提示する技術は、遠隔ロボットによる精密作業における触覚フィードバックや、触感が重要視される商品の仮想的な評価などに応用可能である。一方で、現在普及している触覚提示技術は、操作時のクリック感や単純な振動提示にとどまり、物体表面をなぞった際に生じる微細な触感の再現は未だ困難である。

本研究の目的は、触動作中に指先に提示される微細な振動や摩擦変化を再現し、実物体表面に触れているような触覚体験の提供である。人は物体の質感を認識する際、指先を用いた探索的ななぞり動作を通じて、圧覚や力覚、振動覚などを統合的に処理している。最も単純な探索行為として単一指での走査が想定され、従来は単一指に対して電気的あるいは機械的に振動や摩擦力を提示することで、物体表面の質感を表現しようとする手法が多く提案されてきた[1][2]。しかし、こうした提示方式では、触動作に伴い指先と指関節を刺激する圧覚、力覚を含めた触覚情報を統合的に処理することで触れた物体表面の質感を判断する、より高次の触覚認知の再現には限界がある。

そこで本研究では、複数の指で物体を挟み擦る「ピンチング動作」に着目する。ピンチングは、複数指に提示される力覚や皮膚感覚、運動感覚などの情報を統合して質感を知覚できる探索動作である。Srinivasan らは、こうした情報統合がより精密な触覚認知に寄与する可能性を報告し

た[3]。Choi らは、ピンチング時に生じるせん断刺激等の皮膚感覚や力覚抵抗が、現実的な質感の識別を促進する可能性を示している[4]。本研究では、質感の中で「粗滑感」に着目する。粗滑感とは、触動作中に指先が感じる表面のザラザラ・すべすべといった感触であり、主に振動刺激や皮膚変形、摩擦抵抗の変化によって生じる知覚である。しかし、ピンチング動作を伴う粗滑感提示には、複数の指に振動、摩擦、力覚といった多様な刺激を動作中に同期して制御・提示する必要があり、装置構成や制御手法の複雑さから実装例は限られている。

本研究では、ピンチング中に発生する振動刺激から知覚される粗滑感を再現するため、広帯域の振動を高密度に提示可能なソフト振動アクチュエータ(SVA)[5]を、回転可

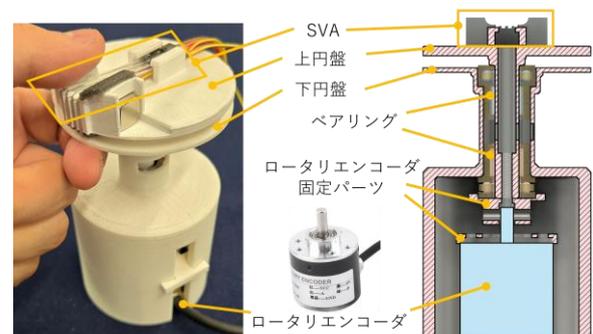


図 1: SVA-P: Soft Vibration Actuator-Pinching Type Tactile Display

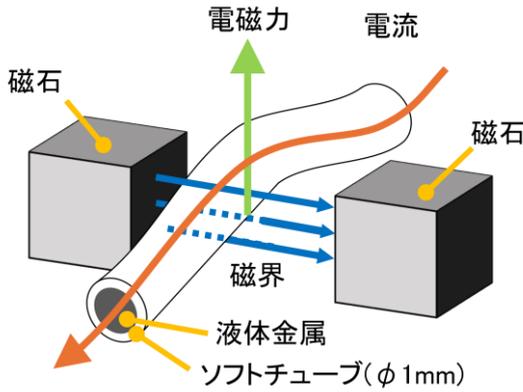


図 2: SVA の駆動原理

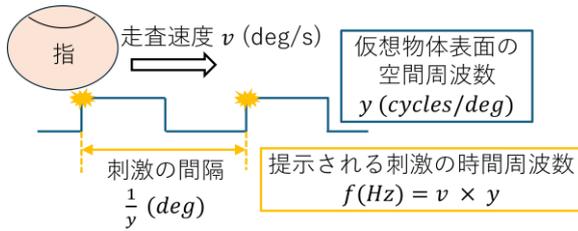


図 3: 本システムが表現する仮想物体表面とその刺激

動する円盤の指接触部に搭載したピンチング型触覚ディスプレイを開発した。さらに、動作中の探索速度に応じて SVA の振動周波数を制御するシステムを構築し、粗滑感提示の有効性を検証した。

## 2. ピンチング型触覚ディスプレイ

### 2.1 SVA-P の構成

ユーザのピンチング動作に応じた振動を提示する触覚ディスプレイとして、SVA-P(Soft Vibration Actuator-Pinching Type Tactile Display)を開発した。本装置の外観と構成の模式図を図 1 に示す。ユーザは、親指と示指で上下の円盤を挟むように指を配置し、上円盤を親指で回転させることでピンチング動作を行う。本装置では、このような回転動作に伴って、親指の接触面に振動刺激が提示される。また、円盤の回転速度に応じて振動の周波数が変化するように設計されており、ユーザは回転操作を通じて時間的に変化する触覚刺激を受け取ることができる。

上円盤の回転軸にはロータリエンコーダ(Akozon 光電インクリメンタル回転エンコーダ, 二相分解能 2400ppr)を固定し、ユーザの動作に伴う円盤の回転情報をリアルタイムで取得する。上円盤と親指の接触部には広帯域の振動提示装置である SVA を組み込み、取得した回転速度に応じた振動を提示する。これにより、ユーザは上円盤の SVA に親指、下円盤に示指を添えて挟み、円盤を回転させることで、ピンチング動作を模倣しながら振動を知覚可能である。

SVA-P の構成要素である SVA の駆動原理を説明する模式図を図 2 に示す。SVA[5]は、2つのネオジウム磁石と、駆動部と触覚提示部を担う液体金属を封入した外径 1mm の柔軟なソフトチューブで構成される。2つの磁石の間にソフトチューブを配置し、チューブ内部の液体金属に電流を印可することで電磁力を発生しチューブが駆動する。本研

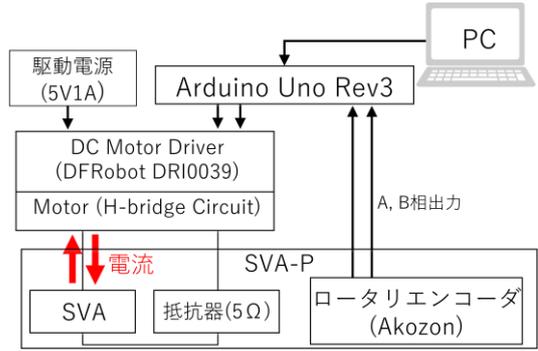


図 4: SVA-P の触覚提示システム構成

表 1: 基準刺激と比較刺激の対応

基準刺激の空間周波数 (cycles/deg)	比較刺激の空間周波数(cycles/deg)									
0.40	0.16	0.22	0.28	0.34	0.40	0.46	0.52	0.58	0.64	
0.80	0.32	0.44	0.56	0.68	0.80	0.92	1.04	1.16	1.28	
1.20	0.48	0.66	0.84	1.02	1.20	1.38	1.56	1.74	1.92	

究では電流の向きを切り替えることにより電磁力の向きを変化させ、ソフトチューブを周期的に変化させることで振動触覚を提示した。ソフトチューブの柔軟かつ軽量である特性から、SVA は幅広い周波数において、ヒトが知覚可能な振幅で振動を生起することができる。

### 2.2 触覚提示システム

本システムは、回転速度に応じて SVA の振動周波数を変化させることで、特定の空間周波数に基づく粗滑感の知覚を促すことを意図して構成されている。本稿では、表現したい仮想物体表面として、図 3 に示すような、円盤上に刷られた単純な一定の空間周波数  $y$  (cycles/deg) を有する凹凸形状を想定する。ユーザの指先がこの物体表面を走査速度  $v$  (deg/s) で走査するとき、凸の立ち上がりの地点において比較的強い刺激を受け、その間隔が大きいほど粗い知覚を得ることが考えられる。本システムでは、仮想物体表面の凹凸形状における凸部の立ち上がりを模した刺激を、回転速度に応じて SVA の振動周波数を制御することで提示し、その時間間隔によって粗滑感の誘発を試みる。

図 4 に SVA-P の触覚提示システムの構成を示す。10ms の間隔で取得したロータリエンコーダの A, B 相の状態変化回数から算出された回転速度  $v$  (deg/s)、表現したい凹凸形状の空間周波数を  $y$  (cycles/deg) に対し、SVA の周波数  $f$  (Hz) は  $v$  と  $y$  の乗算により求まる。

マイコン(Arduino Uno Rev3)はこの周波数に基づいた矩形波の駆動信号を生成し、DC モータドライバ(DFRobot DRI0039)に送信する。モータドライバは、受信した信号に従って H ブリッジ回路を制御し、SVA に流れる電流の方向を周波数通りに周期的に切り替えることで、所定の周波数の交流的な電流(5V, 1A)を印可する。PC からマイコンへの入力に応じて空間周波数を設定し、異なる凹凸形状の仮想物体表面を切り替えて提示できる構成である。

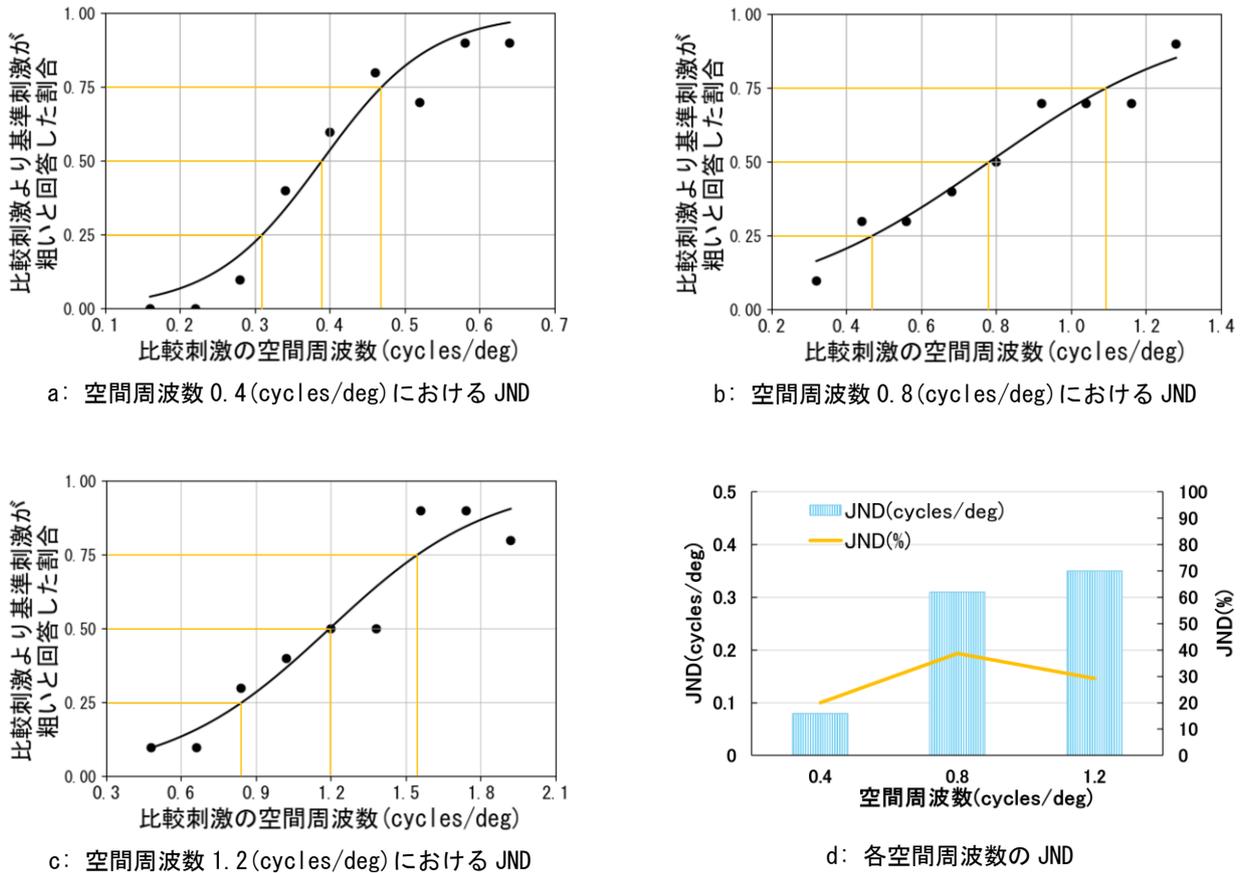


図 5: 実験結果

### 3. 評価実験

#### 3.1 実験手法

開発した SVA-P、及び触覚提示システムの、粗滑感提示の有効性を検証するため、複数の空間周波数に対し丁度可知差異(以下、JND)を算出し、表現可能な凹凸形状の空間周波数の段階を求めた。本実験において、JND は増分域と減分域の値の平均として算出する。

実験は健康成人大学生 1 名を対象に実施した。実験参加者は椅子に座りリラックスできる姿勢を維持して、利き手で SVA-P を操作して刺激を知覚した。実験参加者は右利きであった。実験参加者には、事前に SVA-P を用いて、異なる空間周波数を設定した刺激提示に慣れてもらった。

実験では、実験参加者に SVA-P を用いて 2 種類の空間周波数が設定された刺激を連続して提示し、より粗く感じた刺激を回答させた。実験で提示する刺激は、比較の基準となる刺激(以下、基準刺激)と、比較の対象となる刺激(以下比較刺激)の 2 種類とした。表 1 に実験で用いた基準刺激と比較刺激の対応を示す。基準刺激には、予備実験の結果と SVA-P が提示可能な振動帯域を考慮した、空間周波数 0.4, 0.8, 1.2 (cycles/deg) の 3 条件を設定した。これはサンドペーパーの 12 番, 20 番, 30 番の粒度と同等である。比較刺激には、基準刺激の空間周波数とその前後の 4 条件ずつ、計 9 条件を設定した。加えて、「基準刺激から比較刺激」、「比較刺激から基準刺激」の 2 種類の順序条件を設けた。

1 回の試行の流れは、まず実験者が、基準刺激、比較刺激、順序条件の組み合わせからランダムに選出する。次に、1 秒間の注意音の後に、順序条件を加味した刺激が設定されたピンチング型触覚ディスプレイを、実験参加者が操作することで刺激を提示する。続いて、再度 1 秒間注意音を鳴らした後に、もう一方の刺激を提示する。最後に、実験参加者が「最初の刺激と比較して、2 つ目の刺激の方が粗いか」という質問に、「はい」、「いいえ」の 2 択からひとつを口頭で回答する。以上を 1 試行とし、全ての基準刺激、比較刺激、順序条件の組み合わせ 54 パターンを各 5 試行ずつ、総計 270 試行をランダムに繰り返した。

#### 3.2 結果と考察

基準刺激が比較刺激より粗いと回答した割合を算出し JND を求めた。実験結果を図 5 に示す。図 5-a, 図 5-b, 図 5-c において、縦軸は「基準刺激が比較刺激より粗いと回答した割合」、横軸は比較刺激の空間周波数(cycles/deg)を表す。図中の点は実験で取得したデータ、実線はロジスティック回帰から求めたシグモイド曲線を表し、その曲線上における、縦軸の割合が 0.75, 0.25 のときの空間周波数から増分域、減分域を求めた。

図 5-a から図 5-c より、各基準刺激の空間周波数に対する JND は、空間周波数が 0.4, 0.8, 1.2 (cycles/deg) のときそれぞれ、0.08, 0.31, 0.35 (cycles/deg) となった。図 5-d に、本実験で算出した、ある基準刺激における JND を、空間周波

表 2: 異なる空間周波数の回転情報

空間周波数 (cycles/deg)	最大速度の 平均値 (deg/s)	最大加速度の 平均値 (deg/s <sup>2</sup> )	ストロークの 平均値(deg)
0.4	241.20	4010.16	17.42
0.8	230.65	3869.89	16.99
1.2	226.75	3850.20	16.58

数(cycles/deg), 及び基準刺激の割合(%)で示す。これより、空間周波数が小さいほど粗さの知覚が容易になる傾向が示唆された。また、空間周波数が大きくなるほど、JNDが増加する傾向が示唆された。この結果は本システムにおいて、ピンチングに伴い提示される振動刺激の周波数差が、粗さの知覚に差を生じさせる要因として考える。

ウェーバー則によると、周波数の弁別閾は刺激の強さに比例して大きくなる[6]ことから、空間周波数の増加に伴いJNDが増加することは妥当である。Israrらは一定の周波数で振動する基準刺激に対しおよそ20~30%の値にJNDは収束すると報告しており[7]、本実験でも空間周波数0.4, 1.2(cycle/deg)の条件において同様の傾向が確認された。以上のことから、設定した空間周波数の間隔以下の粗さ弁別が可能であることから、SVA-Pは3段階の粗滑感表現が可能である。

しかしながら、空間周波数が0.8(cycles/deg)のときのJNDは38.8%であり、先行研究[7]で示されたJNDの20~30%の収束条件を上回った。これは、刺激提示装置であるSVAの周波数により増減するゲイン特性に起因する。また、比較刺激の空間周波数と回転速度から、指先が振動に対し高い感度を有する200~250 Hzの高周波帯に振動が提示された可能性があり、その結果、振動の知覚強度の違いによって弁別が困難になった。

さらに、特に空間周波数が低い比較刺激条件では、「自然な粗さ知覚とは言い難い」とする主観的な報告も見られた。これは、低周波振動による粗さ知覚には皮膚変形の寄与が大きく、振幅の違いが知覚に影響を及ぼすためと考える。実際、Okamotoらが、粗さ知覚が提示される刺激の振幅に影響される可能性を指摘している[8]。

また、実験を通して取得した回転速度、ストロークを各空間周波数間で比較し、ピンチング動作の差異を検証した。表2に、空間周波数毎の最大回転速度、最大角加速度、ストロークの平均値を示す。Yokosakaらは、実物体の触覚評価において走査速度、加速度、及びストロークが強い影響を及ぼすと報告した[9]。しかし、本実験において有意な傾向は見られなかった。これは、本デバイスでは探索運動を実物体と同様に自由に行うことが難しく、特に走査方向や姿勢が制限されていたことにより、Yokosakaらが指摘する要因の影響が本実験で顕著に現れなかったためと考える。

本システムにおけるSVAの振動は、周波数に応じて振幅も変化するため、空間周波数の違いが刺激強度の違いと

して知覚され、それが刺激の弁別に影響した可能性がある。これは、本システムにおける周波数と振幅の制御性の低さに起因すると考えられる。今後は、知覚特性に応じた振動、振幅制御を最適化することで、より自然で弁別しやすい粗さ知覚の提示が可能になることが期待できる。

#### 4. おわりに

本研究では、多様な触覚刺激により高次の知覚を提示することを目的として、複数の指で物体を挟み擦るピンチング動作に着目し、ピンチングを模倣した動作により振動提示可能なSVA-Pを開発した。さらに、ピンチングに伴う振動提示システムを実装し、粗滑感提示の有効性を検証した。実験の結果、開発したシステムは空間周波数が0.4~1.2(cycle/deg)の単純な凹凸形状を指先が走査する際に知覚する粗滑感を3段階で提示できることが示された。

今後は、SVAの振幅、及び周波数の制御性を向上させ、振動刺激で提示可能な触覚表現の幅を検証する。搭載されるSVAは指先の狭小範囲に独立な振動を提示可能であり、刺激の方向感や弾性感といった粗さ以外の情報を表現できると考える。その後、SVA-Pに摩擦力や圧力等の振動以外の刺激提示機構を実装し、触動作を伴うマルチモーダルな刺激提示を実現することで、摩擦感や硬軟感を含むより多次元の触感を自然に提示するシステムを開発する。

#### 参考文献

- [1] Shun Suzuki, Seki Inoue, Masahiro Fujiwara, Yasutoshi Makino and Hiroyuki Shinoda, "AUTD3: Scalable Airborne Ultrasound Tactile Display", IEEE Transactions on Haptics, 14(4), 740-749, 2021.
- [2] H. Tomita, S. Saga, H. Kajimoto, S. Vasilache and S. Takahashi, "A study of tactile sensation and magnitude on electrostatic tactile display", 2018 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS), 158-162, 2018.
- [3] Srinivasan MA, LaMotte RH, "Tactual discrimination of softness", J Neurophysiol, 73(1), 88-101, 1995.
- [4] Inrak Choi, Eyal Ofek, Hrvoje Benko, Mike Sinclair, and Christian Holz, "CLAW: A Multifunctional Handheld Haptic Controller for Grasping" 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '18), 654, 1-13, 2018.
- [5] 清水 真陽, 安藤 潤人, 野間 春生, "指先における微細な触覚再現のためのソフト振動アクチュエータを用いた高密度触覚ディスプレイ", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 29(4), 293-301, 2024.
- [6] 岡嶋克典ら, "感覚・知覚実験法", 朝倉書店, 第1版, 朝倉書店, 2008.
- [7] A. Israr, H. Z. Tan, and C. M. Reed, "Frequency and amplitude discrimination along the kinesthetic-cutaneous continuum in the presence of masking stimuli", J. Acoustical Soc. America, 120(5), 2789-2800, 2006.
- [8] S. Okamoto and Y. Yamada: Perceptual properties of vibrotactile material texture, "Effects of amplitude changes and stimuli beneath detection thresholds", 2010 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, 384-389, 2010.
- [9] Yokosaka T, Kuroki S, Watanabe J, Nishida S, "Linkage between Free Exploratory Movements and Subjective Tactile Ratings", IEEE Trans Haptics, 10(2), 217-225, 2017.