



回転円板の表面形状を利用した動的に粗さ感変調可能な なぞり感提示手法の検討

加藤総真, 溝口泉, 梶本裕之

電気通信大学 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, {kato, mizoguchi, kajimoto}@kaji-lab.jp)

概要: 物体の摩擦やテクスチャを識別する上で, なぞり感は重要な役割を果たす. 我々は回転する円板の中心に指先を接触させることでなぞり感を提示する手法について研究を進めてきた. 本手法は従来の手法と比較して提示装置を小型かつシンプルにすることができるが, 一方で提示する感覚を変えられないという課題があった. 本研究では, 円板の表面形状を工夫することで提示する粗さ感を動的に切り替える方法について検証した. 実験ではスリット状の凹凸が設けられた円板の回転によって生じる感覚を, 粗さの異なる紙やすりを指標として評価した. その結果, 回転速度が増加するとより粗く感じる傾向が見られたが, 一方でスリットの線の本数が増加するにつれてその傾向は弱まることも示唆された.

キーワード: 触覚, なぞり感

1. はじめに

我々は日常的になぞり運動を行い, その際に生じる感覚, すなわちなぞり感を手がかりとして物体のテクスチャや摩擦を知覚している. なぞり感を提示することはバーチャルリアリティ体験の質を向上させる上で重要な役割を果たす.

なぞり運動時の皮膚変形を再現することでなぞり感を提示する手法はこれまで多数提案されている. これらは主に摩擦係数を変化させるもの[1], 接触面をせん断方向に動かすもの[2], ローラーや円板, ベルトの回転を用いるもの[3][4][5]に大別される. 中でも最後に挙げた手法は実際のなぞり運動時の皮膚変形を忠実に再現しているため, 高いリアリティのなぞり感を提示しうると考えられる. 一方でこのような手法には共通して, 装置が大型, もしくは複雑になりやすいという課題があった.

我々はこれまでの研究において回転する円板の中心に指先を接触させることでなぞり感を提示する手法を提案した. 本手法は従来の手法と比較して, 装置を大幅に小型化可能であるという利点があった. 一方で, 提示するテクスチャを動的に変えることが出来ないため, 応用可能なアプリケーションが限定されるという課題があった.

人が物体の表面をなぞる際, 物体の表面と指先が相互作用することで指先に振動が生じる. この振動の周波数は物体の表面形状に依存しており, 例えば物体表面の凹凸が細かい場合には高く, 粗い場合には低くなる. このため, なぞり時に提示する振動の周波数を変えることで知

覚される粗さやテクスチャを変調することが出来る[6][7].

本研究では, 回転する円板の表面形状を工夫することでなぞり運動時の粗さ知覚を動的に変調する手法を提案する. 円板の表面に凹凸を設けることで, 回転速度の変化によって指先皮膚に生じる振動の周波数を変えられると考えられ, これによって知覚される粗さ感を変調できる可能性がある. 一方, テクスチャ知覚はなぞり速度に依存しないという先行研究[8]が存在するが, 本研究では人が速度変化を知覚できる程度の低周波領域を扱うため検証の必要がある.

2. 実験

本実験では表面をスリット状に加工した円板について, 回転速度と知覚される粗さ感の関係性を明らかにする. この円板をスリット状円板と呼ぶ. スリット状円板はその構造上, 回転によって線の本数と回転速度に比例した振動を生じさせると考えられる. このことから, 線の本数がより多く, 回転速度がより高いほど滑らかな感覚になる可能性が考えられる.

2.1 実験セットアップ

実験セットアップを図 1 に示す. なぞり感提示装置の基本的な構造は前報と同様であり, 指先と回転する円板の中心を触れさせることでなぞり感を提示する[9]. なぞり感提示装置の外観を図 2 に示す. 本装置は円板を回転させる DC モーター, 制御に用いるエンコーダ, 円板の押下力を測定するロードセル (HSFPAR003A, Alps Alpine) か

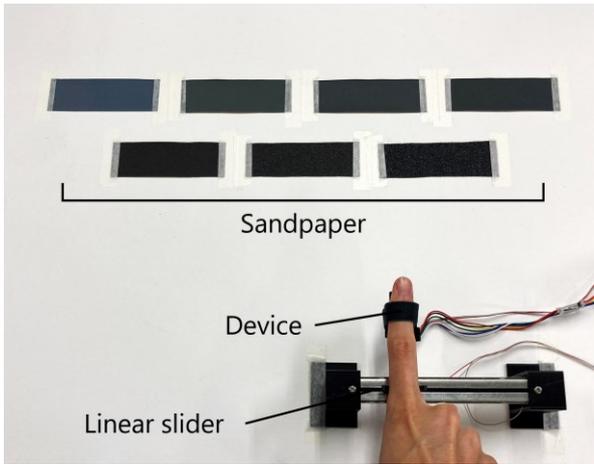


図 1: 実験セットアップ

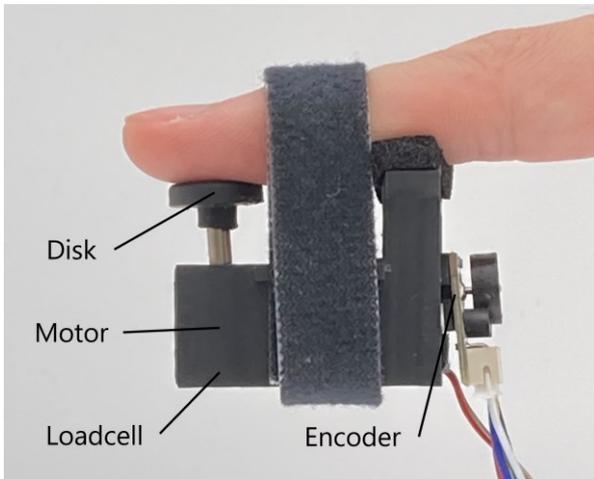


図 2: なぞり感提示装置の外観

ら構成されている。

本装置による刺激提示時になぞり速度および距離を統制するためリニアスライダ（RSA0N11M9A0K, Alps Alpine）を用いた。実験では、参加者は1秒間ごとに鳴る音声手がかりに合わせてリニアスライダの端から端へ3往復分なぞり運動を行った。音声は1試行あたり計7回鳴り、1回目は開始、7回目は終了を意味する。リニアスライダの移動量の実測値は95mmであるため、なぞり速度は（等速運動を仮定すると）95mm/sとなる。

装置によって提示された感覚の評価指標として紙やすりを採用した。実験には#60, #120, #240, #400, #800, #1500, #3000の計7種類を用いた。実験では滑らかなものから粗いものの順に1から7の番号を割り当てた。#1500の紙やすりは2, #120の紙やすりは6となる。これらの紙やすりは摩耗の影響を抑えるため、参加者が変わるとに新しいものに取り換えられた。

2.2 実験条件

実験条件は円板の線の本数および回転速度の2要因から成る。スリットの有無、および線の本数による影響を検証するため、円板は図3に示す、線が0本（No-line条件）、1本（1-line条件）、2本（2-line条件）、4本（4-line条件）の

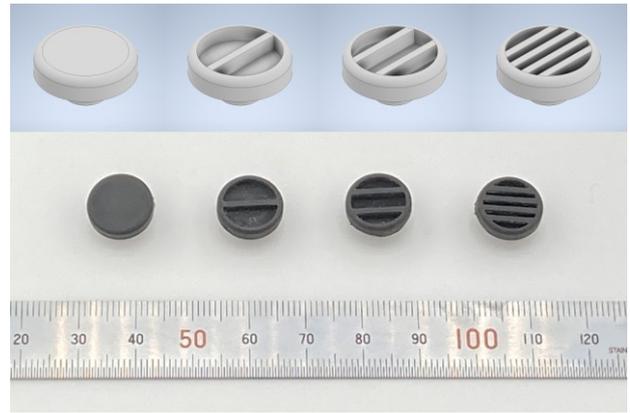


図 3: 実験に用いられたスリット状円板

計4種類を用いた。円板の表面は#3000の紙やすりで研磨し、滑らかにした。回転速度は前報を踏襲し、円板の周速がなぞり速度の36%に一致する条件を基準（Middle条件）とし、その0.5倍（Low条件）と2倍（High条件）を含む計3条件とした。以上より、実験条件は円板4条件と回転速度3条件を掛け合わせた計12条件となる。

2.3 実験手順

実験の前段階として、参加者は初めにはかりを用いて紙やすりをおよそ50gfの押下力でなぞる練習を行った。次に、右手の人差し指に装置を装着し、装置に搭載されたロードセルの値を基に指先と円板の接触力をおよそ50gfに調節した。この時ベルクロに印を付けておくことで、再装着時にこの手順を省略した。最後に、装置を装着した状態で第三関節付近をリニアスライダ上に置き、音声手がかりに合わせて左右に指を動かす練習を行った。以上の手順を完了したのち、実験に移行した。

はじめに、参加者は人差し指に装置を装着し、印を参考にベルクロを締めることで指に固定した。次に、指をリニアスライダ上に置いた状態で音声手がかりに合わせてなぞり運動を行った。この時、指先に接触している円板が回転し、なぞり感が提示された。その後装置を外し、装置から提示された感覚に最も近い紙やすりを選び回答した。以上の手順を12条件ごとに繰り返した。

試行中は聴覚による影響を軽減するためヘッドホンから音声手がかりと同時にホワイトノイズが再生された。

2.4 実験結果

実験結果を図4に示す。黄色の線は中央値、緑色の三角は平均値を表す。このデータに整列ランク変換分散分析（ART-ANOVA）[10]およびボンフェローニ補正を用いた多重比較を適用した。その結果、円板要因ではNo-line条件と1-Line条件間（ $p=0.001$ ）、No-line条件と2-Line条件間（ $p=0.001$ ）、No-line条件と4-Line条件間（ $p=0.049$ ）に有意差が見られた。速度要因ではHigh条件とLow条件間に有意差が見られた。加えて、1-line条件と4-line条件の間にはHigh条件とLow条件の組み合わせで有意な交互作用が見られた（ $p=0.041$ ）。他の組み合わせに有意差は見られなかった。

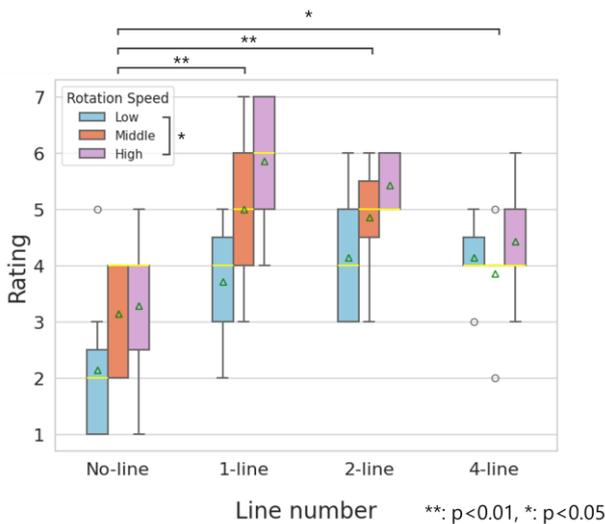


図 4: 実験結果

2.5 考察

実験結果より、表面がスリット状の円板はスリットの無い円板よりも粗く知覚されること、および回転速度が増加するとより粗く知覚されることが示唆された。我々は回転速度が増加するにつれて指先で生じる振動の周波数は増加し、結果より滑らかに感じるという仮説を立てた。一方で、今回得られた知見はこの仮説とは対照的である。

この原因の一つとして、回転速度が高くなることで指先皮膚に生じる振動の量が増加し、このことが粗いという解釈につながった可能性が考えられる。加えて、一部の実験参加者は回転に加えて振動を感じる条件があったとコメントした。回転速度が高くなるにつれてモーター自身の振動も大きくなるため、これも原因の一端を担っている可能性がある。なお、この振動が No-line 条件においても速度依存性が見られる原因である可能性もあるが、一方で振動強度が異なるにも関わらず Middle 条件と High 条件の間にほとんど差が見られないため、今後検証する必要がある。

交互作用では、1-line 条件では Low 条件と High 条件の間には大きな差がある一方で 4-line 条件ではほとんど無いことが示された。このことを踏まえると、より線の本数を増やす、または異なる形状にすることによって回転速度と知覚される粗さの関係を変えられる可能性が考えられる。

3. 結論

本研究では、表面にスリット状の凹凸を設けた円板の中心に指先を接触させることで、なぞり感を提示しつつその際知覚される粗さ感を変調する手法を提案した。加えて、粗さの異なる紙やすりを評価指標として、装置による提示刺激の感覚と粗さ感の関係を検証する実験を行った。その結果、回転速度の増加に伴い、より粗く感じるようになることが示された。一方で、円板のスリットの線の本数が増加すると、その傾向は弱まることも示唆された。

今後は本研究で得られた知見を基に表面形状や実験装

置の最適化を進めつつ、静電触覚など粗さ感変調に関する異なるアプローチについて検討する。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP20H05957, および一般財団法人テレコム先端技術研究支援センター (SCAT) の助成を受けたものです

参考文献

- [1] O. Bau, I. Poupyrev, A. Israr, and C. Harrison, "TeslaTouch: electrovibration for touch surfaces," in Proceedings of the 23rd annual ACM symposium on User interface software and technology, NY, USA, 2010
- [2] V. Yem, R. Okazaki, and H. Kajimoto, "FinGAR: combination of electrical and mechanical stimulation for high-fidelity tactile presentation," in ACM SIGGRAPH 2016 Emerging Technologies, NY, USA, 2016
- [3] E. Whitmire, H. Benko, C. Holz, E. Ofek, and M. Sinclair, "Haptic Revolver: Touch, Shear, Texture, and Shape Rendering on a Reconfigurable Virtual Reality Controller," in Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, NY, USA, 2018
- [4] M. J. Kim, N. Ryu, W. Chang, M. Pahud, M. Sinclair, and A. Bianchi, "SpinOcchio: Understanding Haptic-Visual Congruency of Skin-Slip in VR with a Dynamic Grip Controller," in Proceedings of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, NY, USA, 2022
- [5] P. Zhang, M. Kamezaki, Y. Hattori, and S. Sugano, "A Wearable Fingertip Cutaneous Haptic Device with Continuous Omnidirectional Motion Feedback," in 2022 International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2022
- [6] M. Hollins, A. Fox, and C. Bishop, "Imposed Vibration Influences Perceived Tactile Smoothness," Perception, vol. 29, no. 12, pp. 1455–1465, 2000
- [7] S. Asano, S. Okamoto, and Y. Yamada, "Vibrotactile Stimulation to Increase and Decrease Texture Roughness," IEEE Transactions on Human-Machine Systems, vol. 45, no. 3, pp. 393–398, 2015
- [8] Z. M. Boundy-Singer, H. P. Saal, and S. J. Bensmaia, "Speed invariance of tactile texture perception," J Neurophysiol, vol. 118, no. 4, pp. 2371–2377, 2017
- [9] S. Kato, Y. Suga, I. Mizoguchi, and H. Kajimoto, "Presentation of a Tracing Sensation by Means of Rotation Stimuli," in 2024 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS), 2024
- [10] J. O. Wobbrock, L. Findlater, D. Gergle, and J. J. Higgins, "The aligned rank transform for nonparametric factorial analyses using only anova procedures," in Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, NY, USA, 2011