

摩擦可変型回転円盤を用いた高品位触感レンダリング



梶本 裕之 (Hiroyuki KAJIMOTO, Ph. D.)

電気通信大学 情報理工学研究科 情報学専攻 教授
(Professor, University of Electro-Communications)

日本バーチャルリアリティ学会、計測自動制御学会、ヒューマンインタフェース学会、IEEE、ACM

受賞：Best Associate Editor Award, IEEE Transactions on Haptics (2025 年)、貢献賞、日本バーチャルリアリティ学会 (2016 年) 文部科学大臣表彰 若手科学者賞 (2013 年) 他

著書：Shitsukan-Understanding and Manipulating Material and Quality Perception, Springer (2026 年) 質感科学ハンドブック, 東京大学出版会 (2025 年) 他

研究専門分野：バーチャルリアリティ ヒューマンインタフェース

あらまし

本研究では、VR 空間における高品位な触感提示を目的として、指先サイズの回転円板を用いた触覚提示手法を検討した。指腹を円板中心に接触させ、指の移動に応じて円板を回転させることで、従来の大型なローラー・ベルト機構を用いずにリアリティのあるなぞり感を提示できることを確認した。さらに、回転方向・回転速度の影響評価、振動重畳によるテクスチャ感提示、円板表面形状による粗さ感変調、静電気力を用いた摩擦感変調を行い、回転円板を基盤とする多様な触感表現の可能性を示した。これにより、単一の小型機構を用いながら、なぞり感、粗さ感、摩擦感を統合的に提示する触覚レンダリングの方向性を明らかにした。また、回転刺激を用いた触覚提示の拡張として、足元のターンテーブルにより打撃時の反力・臨場感を提示する手法も検討した。以上により、小型かつ拡張性の高い触覚提示手法の基盤を構築した。

1. 研究の目的

本研究の目的は、VR 空間において、ユーザが提示された物体に触れたり、その表面をなぞったりした際に

生じる触感を、簡便かつ小型の装置によって提示することである。現在広く用いられている VR コントローラの多くは振動刺激を主たる触覚フィードバックとして用いている。しかし、実際に物体表面をなぞる際には、振動だけでなく、皮膚の接線方向の変形、摩擦、粗さ、凹凸、滑りといった複合的な感覚が生じる。したがって、VR 体験の質を高めるには、単純な振動を超えて、なぞり動作に伴う皮膚変形や摩擦感を再現することが重要である。

従来、なぞり感(※1)を提示するためには、板を直線的に動かす、ローラーやベルトを回転させる、あるいは大型の遭遇型デバイスを用いる手法が提案されてきた。これらは物理的に自然なせん断刺激(※2)を提示できる一方、装置が大型化しやすく、複数指への展開が困難であるという課題があった。

本研究では、円板の外周ではなく中心に指先を接触させるという新しい構成を採用することで、指先サイズの接触部を用いた小型ななぞり感提示を目指した(図 1)。これにより、将来的には複数の指にデバイスを装着し、VR 空間に提示された物体を把持・操作する際の触感を各指に提示することが可能になると期待される。

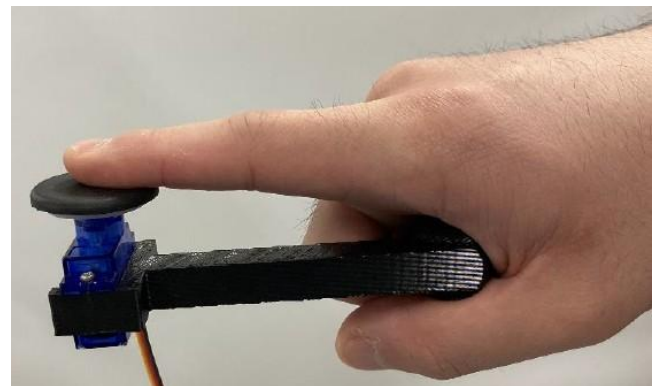


図 1 提案手法のイメージ

2. 研究の背景

2.1 なぞり感提示の重要性

人は日常的に、物体表面を指でなぞることで、その材質、粗さ、摩擦、凹凸などを知覚している。このとき指先皮膚には、指の運動方向とは逆向きの接線方向変形が生じる。したがって、物体表面との相互作用を

摩擦可変型回転円盤を用いた高品位触感レンダリング

リアルに提示するには、単なる振動ではなく、なぞり動作に伴う皮膚のせん断変形を提示することが有効である。

しかし、VR 環境において指先にせん断刺激を提示することは容易ではない。平板を動かす手法では可動範囲に制約があり、ローラーやベルトを用いる手法では装置が大型化する。特に、HMD を装着したユーザが手を自由に動かしながら、各指で VR 空間中に提示された物体に触れる状況を想定すると、触覚提示デバイスは指先に装着可能なサイズである必要がある。

2.2 皮膚変形方向の曖昧性への着目

本研究の基礎となる発想は、なぞり感提示において、皮膚変形の「方向」を厳密に再現する必要は必ずしもないのではないか、という点にある。先行研究では、指先皮膚に生じるせん断変形の方法が物理的に自然な方向と異なっても、主観的なリアリティが大きく損なわれない可能性が示されていた。本研究ではこの知見を踏まえ、実際のなぞり動作で生じる直線的な皮膚変形を厳密に再現するのではなく、指先に回転刺激を与えることによって、なぞり感として解釈される触覚刺激を提示することを試みた。

この発想により、従来は大型化しやすかったなぞり感提示装置を、指先サイズの回転円板にまで小型化できる可能性が生まれた。円板の中心に指を置く構成では、外周を指に接触させる従来方式と異なり、接触部を指幅以下に収めることができるため、複数指への展開にも適している。

3.研究の方法

3.1 回転円板型なぞり感提示デバイスの構築

まず、指先と回転円板の中心を接触させることでなぞり感を提示するデバイスを開発した。初期の把持型プロトタイプでは、直径 30 mm の円板をサーボモータで回転させ、ユーザが手を動かす速度に応じて円板の回転速度を制御した（図 1）[1][2]。その後、指に直接装着可能な小型デバイスへと改良し、直径 12 mm 程度の円板、DC モータ、エンコーダ、固定用ベルクロ、3D プリントされたフレームから構成される装置を製作した（図 2）。手の動きは光学式モーションキャプ

チャにより取得し、Unity 上で処理した後、マイコンを介して円板の回転速度を制御した（図 3）。

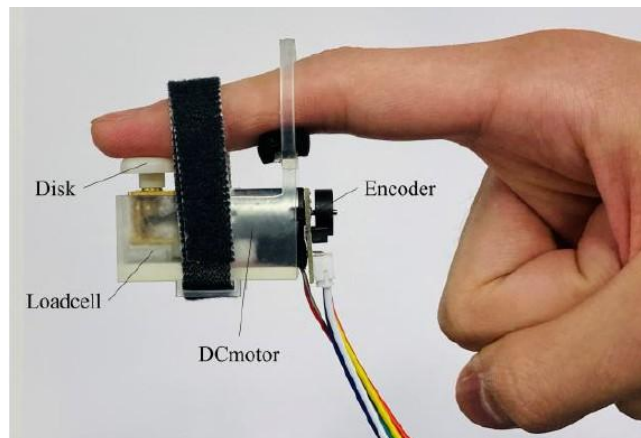


図 2 回転円板型なぞり感提示デバイス

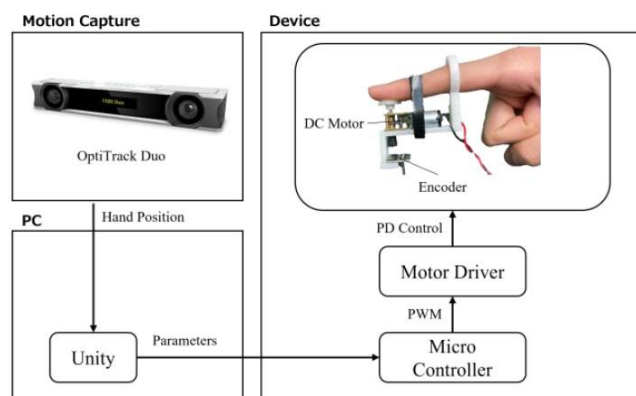


図 3 なぞり感提示デバイスのシステム構成

3.2 回転方向および回転速度の影響評価

提案手法の有効性を検証するため、実物の板をなぞった際の感覚を基準として、デバイスが提示する刺激のリアリティを評価した。表面材質として、滑らかな表面および粗い表面を用い、無回転、時計回り、反時計回り、往復運動に同期した回転方向切替などの条件を比較した。その結果、無回転条件と比較して、円板を回転させた条件ではリアリティのあるなぞり感が提示されることが確認された。一方で、回転方向の違いによる主観的リアリティの差は限定的であり、粗い表面では回転方向を切り替える条件が比較的有效である可能性が示唆された[3][4]。

摩擦可変型回転円盤を用いた高品位触感レンダリング

また、回転速度の影響を調査する実験では、手の移動速度に対する円板周速のゲインを変化させ、主観的リアリティを評価した。その結果、回転速度の違いはリアリティに大きな影響を及ぼさないことが示唆された。この結果は、なぞり感提示において、刺激の厳密な速度一致よりも、指先にせん断刺激が存在すること自体が重要である可能性を示している。

3.3 振動重畳によるテクスチャ感提示

次に、回転円板によるせん断刺激に振動を組み合わせることで、異なるテクスチャを提示する手法を検討した[5]。物体表面をなぞる際には、表面の凹凸間隔やなぞり速度に応じた振動が指先に生じる。そこで、円板を回転させる DC モータに任意波形を重畳し、同一のアクチュエータで回転と振動の両方を提示する構成を採用した。

実験では、間隔の異なる一次元グレーティング板を実物基準として、デバイスによる提示刺激のリアリティを評価した(図 4)。その結果、回転円板に振動を重畳することで、異なる粗さに対応するなぞり感を提示できることが示唆された。特に、回転円板によるせん断方向の振動が、一次元グレーティングのテクスチャ感をリアルに再現できた点は重要な成果である。一方で、せん断刺激の有無がリアリティに有意差を与えない条件もあり、今後は一般的な振動子との比較や、振動方向・振幅・周波数の最適化が必要である。

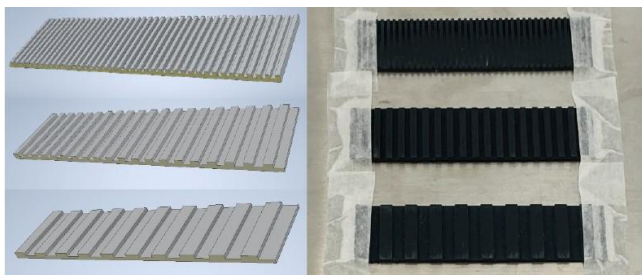


図 4 実験用グレーティング

3.4 円板表面形状による粗さ感変調

さらに、円板表面そのものに凹凸を設けることで、回転時に生じる皮膚変形パターンを変化させ、知覚される粗さ感を動的に変調する手法を検討した[6][7]。

具体的には、スリット状の凹凸を有する円板を作成し、線の本数および回転速度が粗さ感に与える影響を調査した(図 5)。評価には粗さの異なる紙やすりを使い、デバイスによる提示刺激がどの程度の粗さに相当するかを被験者に回答させた。

実験の結果、スリットを有する円板はスリットのない円板よりも粗く知覚されること、また回転速度が増加するとより粗く感じられる傾向があることが示された。ただし、スリット本数が増えると回転速度による粗さ感変化の傾向は弱まることも示唆された。これは当初想定していた「速度上昇により振動周波数が高くなり滑らかに感じられる」という仮説とは異なる結果であり、回転速度の上昇に伴う振動量の増加やモータ由来の振動が粗さ感に寄与した可能性が考えられる。

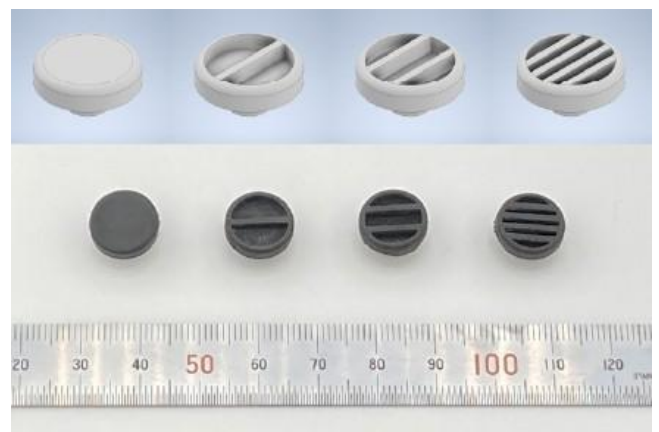


図 5 円板表面形状による粗さ感変調

3.5 静電気力を用いた摩擦感変調

当初計画の重要な要素であった摩擦変調(※3)については、静電気力を応用した回転円板型デバイスを実装した(図 6、図 7)[8]。円板は円形の銅板表面を厚さ 10 μm の絶縁性フィルムで覆った構成とし、直径は約 16 mm とした。銅板に最大 300 V のパルス電圧を印加することで、指先と円板の間に静電気力を発生させ、円板が回転する際の摩擦感を変調することを試みた。

この手法は、従来は固定されたタッチパネル表面で用いられてきた静電触覚を、回転円板に応用する点に特徴がある。静電触覚は通常、指と表面の相対滑りを必要とするためウェアラブル化が難しいが、本研究の

摩擦可変型回転円盤を用いた高品位触感レンダリング

構成では円板の回転によって指先と表面の相対運動を生じさせることができる。そのため、小型デバイスの利点を維持したまま、摩擦感や振動感を動的に提示できる可能性がある。

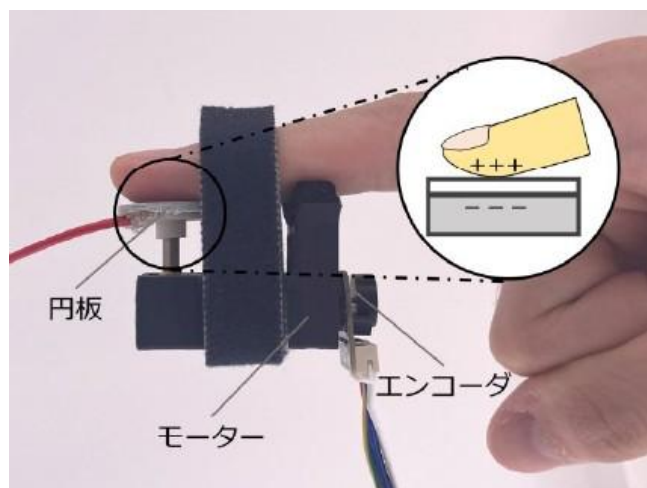


図 6 静電気力を用いた摩擦感変調

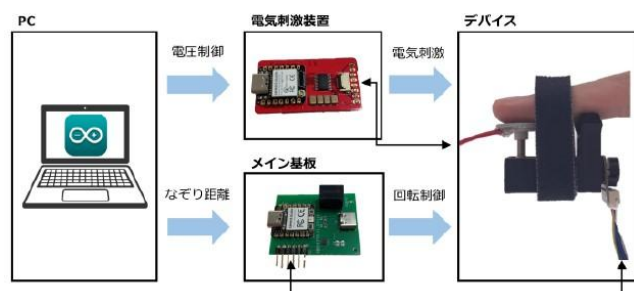


図 7 静電気力を用いた摩擦感変調のシステム構成

3.6 ターンテーブルを用いた打撃感提示への拡張

本研究の拡張的成果として、回転円板を用いた触覚提示の考え方を指先から全身へ拡張し、地面に設置したターンテーブルを用いた打撃感提示を検討した（図8）[9]。従来の打撃感提示は、手元の振動、衝撃、反力提示を中心としていたが、実際の打撃動作では反力は手から身体を通じて最終的に足と地面の間に伝わる。そこで、打撃の瞬間に足元のターンテーブルを瞬間的に回転させることで、地面から身体全体へ作用する反力を疑似的に提示する手法を提案した。

実験では、頭部搭載型ディスプレイ（Meta Quest 3）」を用いた VR 環境内で、ユーザがラケットでボールを打

つ場面を設定した。ターンテーブルの回転方向を比較した結果、反時計回りから時計回りへ切り替える条件において、打撃感や臨場感が無回転条件より有意に向上することが示唆された。また、手元コントローラの振動と足元ターンテーブルの回転を組み合わせた実験では、振動のみの条件と比較して、振動とターンテーブル回転の複合条件で打撃感および臨場感が向上した。これにより、足元回転刺激は、手元振動を補完し、VRにおける身体全体の力覚体験を高める手段となり得ることが示された。

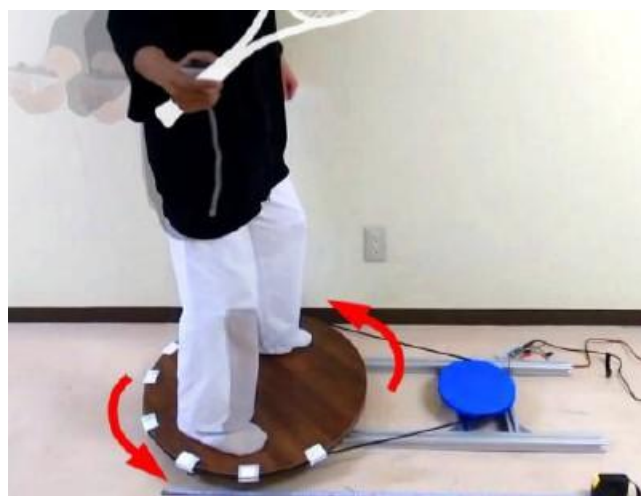


図 8 ターンテーブルを用いた拡張

4. 将来展望

今後は、回転円板型デバイスの小型化、軽量化、装着性の改善を進める必要がある。特に、複数指に装着することを想定すると、デバイス同士の干渉を避けつつ、各指に十分なせん断刺激とテクスチャ刺激を提示できる設計が求められる。また、回転速度、押下力、振動波形、表面形状の関係を定量的に整理し、任意の触感を再現するためのレンダリングモデルを構築することが重要である。

摩擦変調方式に関しては、これまでに振動、表面形状、静電気力による変調をそれぞれ検討した。今後はこれらを統合し、同一デバイス上で粗さ感、摩擦感、凹凸感を独立または協調的に制御することを目指す。例えば、低周波の粗い凹凸感は表面形状によって提示し、高周波のテクスチャ感は振動によって提示し、滑

摩擦可変型回転円盤を用いた高品位触感レンダリング

りや粘着感は静電気力によって提示することで、より多次元的な材質感表現が可能になる。

また本手法の大きな利点は、接触部が指先サイズであり、多指展開に適している点である。今後は、親指と人差し指、さらには両手 10 指への展開を進め、VR 空間上に提示された物体をつまむ、把持する、撫でる、滑らせるといった操作における触感提示を検討する。多指化により、単一指でのなぞり感提示にとどまらず、物体の重さ、形状、表面分布、把持安定性などの知覚にも寄与できる可能性がある。

5. おわりに

本研究は、回転体という単純で堅牢な機構を用いながら、指先のなぞり感、テクスチャ感、摩擦感、さらには身体全体の打撃感までを提示可能にする触覚提示手法の基盤を構築した。今後は、各要素技術の統合と最適化を進めることで、VR・メタバース環境における実用的かつ高品位な触覚インタフェースの実現を目指す。

用語解説

- *1 なぞり感：指で物体表面をなぞったときに生じる触感の総称。表面の粗さ、摩擦、凹凸、滑らかさなどを知覚するための重要な手がかりとなる。本研究では、指先に接触させた回転円板によってこの感覚を提示することを目的とした。
- *2 せん断刺激：皮膚表面に対して横方向に加わる刺激のこと。物体をなぞる際には、指先皮膚が運動方向とは逆向きに引っ張られるように変形する。本研究では、この皮膚の横ずれを厳密に再現するのではなく、回転刺激によって類似の触感を提示した。
- *3 摩擦変調：指と接触面の間の摩擦の大きさを動的に変化させること。摩擦が変わると、滑りやすさ、引っかかり感、粘着感などが変化する。本研究では、回転円板表面に静電気力を加えることで摩擦感を変化させる手法を検討した。

参考文献

- [1] 加藤総真, 須賀悠偉, 宮上昌大, 溝口泉, 梶本裕之, 「回転板による指先へのなぞり感提示手

法の提案」, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 4 pages, doi:

10.1299/jsmermd.2023.1A1-H13, 2023.

- [2] Soma Kato, Yui Suga, Masahiro Miyakami, Izumi Mizoguchi, Hiroyuki Kajimoto, “Presentation of Tracing Sensation to Fingertip Using a Rotating Disk,” in Proceedings of IEEE World Haptics Conference, Work-in-Progress, 1 page, 2023.
- [3] 加藤総真, 須賀悠偉, 溝口泉, 梶本裕之, 「回転刺激を用いたなぞり感提示手法における回転速度が及ぼす影響の調査」, 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 4 pages, 2023.
- [4] Soma Kato, Yui Suga, Izumi Mizoguchi, Hiroyuki Kajimoto, “Presentation of a Tracing Sensation by Means of Rotation Stimuli,” in Proceedings of IEEE Haptics Symposium, pp. 123-128, doi: 10.1109/HAPTICS59260.2024.10520863. 2024.
- [5] Soma Kato, Yui Suga, Izumi Mizoguchi, Hiroyuki Kajimoto, “Presentation of Tracing Sensation through Combination of Disk Rotation and Vibration,” in Proceedings of EuroHaptics, Lecture Notes in Computer Science, vol 14769. Springer, 11 pages, doi: 10.1007/978-3-031-70061-3_25, 2024.
- [6] 加藤総真, 溝口泉, 梶本裕之, 「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」, 第 29 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 3 pages, 2024.
- [7] Soma Kato, Izumi Mizoguchi, Hiroyuki Kajimoto, “Presentation of tracing sensation with different roughness by using disk with uneven surface,” in Proceedings of AsiaHaptics, 4 pages, doi: 10.48550/arXiv.2411.051512024, 2024.
- [8] 加藤総真, 溝口泉, 梶本裕之, 「静電気力を応用した摩擦感変調可能な円板によるなぞり感

摩擦可変型回転円盤を用いた高品位触感レンダリング

提示手法」，計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会，2 pages，2024.

- [9] 島田睦生，溝口泉，梶本裕之，「地面に設置したターンテーブルによる打撃感の提示」，第30回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集，4 pages，2025.
- [10] 加藤総真，溝口泉，梶本裕之，「回転する円板によるなぞり感提示手法」，日本バーチャルリアリティ学会論文誌，Vol. 30，No. 2，pp. 173-182，doi: 10.18974/tvr sj. 30. 2_173，2025.

この研究は、令和4年度SCAT研究助成の対象として採用され、令和5～7年度に実施されたものです。