

フィルムと回転体を用いた滑り感覚の提示に関する研究

坂口正道* 岡本尚也**
荒田純平** 藤本英雄**

Study of Slip Sense Display Using Film and Rotor

Masamichi SAKAGUCHI*, Naoya OKAMOTO**,
Jumpei ARATA** and Hideo FUJIMOTO**

The goal of this study is to present very smooth slip sense when touching a soft object. In this study, we propose the slip sense display without direct slip on a finger tip. User's finger touches a rotating object under a thin film. The film and the rotating object are slipping but the finger and the film aren't slipping in this display. In this study, we developed a basic experimental device and made some experiments to examine the sense when a finger has contact with a soft body of rotation through a film.

1. はじめに

人間の感覚には、視覚や聴覚などの特殊感覚の他に体性感覚がある。体性感覚は、主に皮膚感覚と深部感覚に分類される。皮膚感覚とは、皮膚表面付近に存在する受容器によって知覚される感覚で、マイスナー小体、パチニ小体、メルケル盤、ルフィニ終末等の受容器により、接触感覚、圧覚、振動覚等を知覚する。これに対し、深部感覚とは筋肉や腱に存在する受容器により知覚される感覚で、筋紡錘や腱紡錘で検知する筋肉の長さや張力から、関節の位置や運動感覚を知覚する。

滑り現象とは、接触した物体同士の相対的な運動の一つである。滑りが生じている時、物体には押し付け力やせん断力が作用するほか、表面性状等によりそれらの力は細かく変化する。人には圧力や振動を知覚する受容器は存在するが、滑り感覚を直接知覚する受容器は存在しない。滑り感覚、つまり指や手を対象物に接触させながら移動させている時に感じる感覚は、指先への皮膚感覚と手指の運動感覚の組み合わせにより知覚されるので、触運動知覚と呼ばれる。ただし、表面の摩擦抵抗が小さく滑りやすい物体に触れている時は滑り感覚と表現されるが、表面の摩擦抵抗が小さくない物体に触れている時はなぞり感覚と表現されることもある。本研究では特に滑りやすい物体に直接指先で触れている時の滑り感覚が提示できるディスプレイの開発を目指している。

滑り感覚の提示に関する先行研究として、円筒や球などの回転体を直接指先に接触させる研究¹⁾²⁾や、力覚提示や静電気力によりツール等を介して間接的に提示する研究³⁾、超音波振動や電気刺激、ピンの振動等を用いて擬似的に提示する研究⁴⁾⁵⁾が行われ、硬い物体の表面をなぞる様々な抵抗感、粗さ感が提示されている。

これに対し、本研究では対象物が柔らかく、表面は滑らかで液体で濡れている場所を、指で直接なぞる様なつるつる滑る感覚の提示を目指す。摩擦係数が小さな状態を作り出すためには潤滑剤を用いることが望ましいが、直接触れると潤滑剤が指に付着してしまうほか、ディスプレイと指との位置関係が不安定となりやすい。そこで、本研究では柔軟な回転体と指先との間に薄いフィルムを介在させる手法を提案する⁶⁾⁷⁾。間にフィルムを介することで、手指への潤滑剤の付着を防ぎ、かつ直接指先でつるつる滑りやすい対象物に触れている感覚の提示を行う。これは、手袋をして対象に触れている状態に似ている。

本論文では、2章において対象物を直接指でなぞった場合や回転体に指を接触させた場合、そしてフィルムを介して回転体に触れた場合の力学モデルについて説明する。3章では、開発したフィルムと回転体を用いた滑り感覚ディスプレイの概要について述べる。4章では、開発したディスプレイを用いた抵抗力測定実験を実施し、フィルムを介して回転体に触れた場合の抵抗力を計測する。5章では、開発した滑り感覚ディスプレイを用いた能動的滑り知覚実験を実施し、触感の評価を行う。6章で本研究の結果をまとめる。

2009年3月12日受理

* 豊田理化学研究所研究嘱託
(名古屋工業大学大学院工学研究科)

** 名古屋工業大学大学院工学研究科

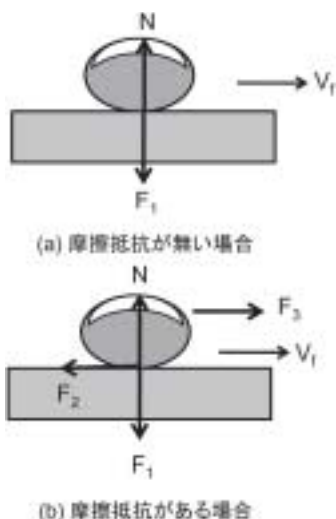


図 1. 指で直接対象物に触れた場合の力学モデル.

2. フィルムを介した滑り現象

図 1 に、指で直接対象物に触れた場合の力学モデルを示す。図中の F_1 は押し付け力、 F_2 は抵抗力、 F_3 は指を動かす力、 N は垂直抗力、 V_f は指の運動速度を表す。図 1(a) は、表面が滑らかで摩擦係数が 0 である対象物の上を指でなぞっている状態の力学モデルを示している。指が力 F_1 で対象物を押し付け、その反作用力である垂直抗力 N が指先に加わった状態で指が速度 V_f で運動しているが、この時水平方向の抵抗力は全く指に作用しない。これは理想的に滑りやすい対象物の上をなぞっている状態と言える。

これに対し、図 1(b) は、水平方向に抵抗力が働く場合の力学モデルを示している。指が速度 V_f で運動する時、指先には押し付け力 F_1 に対する垂直抗力 N の他に、運動の方向と反対方向の抵抗力 F_2 が作用する。抵抗力 F_2 には、摩擦係数に起因する動摩擦力や粘性係数に起因する粘性抵抗力が働く他、対象物が柔らかい場合には変形に起因する抵抗力も働く。このため、指先を一定速度で運動させるには、抵抗力 F_2 と大きさが同じで向きが反対の力 F_3 を常に指に加えなければならない。

図 1(b) において、例えば押し付け力 F_1 や運動速度 V_f を一定にしても、指先と対象物の接触状態は変化しやすく表面性状の影響等も受けるため、抵抗力 F_2 は理想的に一定とはならず、常に細かく変化する。表面が滑らかで非常に滑りやすい感覚を提示するには F_2 をできるだけ小さくすることが望ましいが、逆に指先で対象物に直接触れているような感覚を提示するためには、細かく変化する抵抗力 F_2 を適切に提示することが重要となってくる。抵抗力 F_2 を計測してモデルを構築し、ディスプレイで再現する方法も考えられるが、本研究では、実際に回転体を指先に接触させることで抵抗力の提示を行う。

図 2 に、台車に取り付けられた回転体に指を接触させ

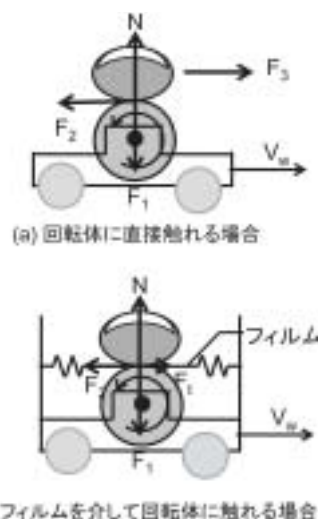


図 2. 台車上の回転体に触れた場合の力学モデル.

た場合の力学モデルを示す。図 2(a) は直接回転体に指が触れている場合、図 2(b) はフィルムを介して回転体に触れている場合を示す。図中の V_w は台車の移動速度、 F_1 はフィルムの張力を表す。台車を動かすための慣性力や抵抗力は無視できるとする。台車上の回転体は、台車の移動速度に合わせて回転速度を制御できる。

図 2(a) において、回転体を停止させた状態で台車を動かすと、指先には押し付け力 F_1 に対する垂直抗力 N しか作用しない。これは図 1(a) の状態と同様であるが、これでは指で直接対象物に触れて滑らせている感覚が得られない。そこで、台車の移動速度 V_w を計測し、この移動速度と同じ速さで反対向きのせん断速度が指と接触している回転体の表面で再現できるように回転体の速度を制御すると、指先には抵抗力 F_2 が加わるようになり、図 1(b) と同じ状態となる。しかし、回転体に指を直接接触させると、指と回転体の位置が不安定になる他、抵抗力を低減させるために潤滑剤を用いると、潤滑剤が指に付着してしまう。

そこで、本研究では図 2(b) に示すフィルムを介して回転体に触れる滑り感覚ディスプレイを提案する。図 2(a) と同様に台車の上に回転体が設置されているが、更に回転体の上に薄いフィルムが取り付けられ、指はフィルムを介して回転体に触れる構造となっている。回転体とフィルムの間には滑りが生じるが、フィルムと指の間には滑りは生じない。指と回転体が直接接触しているわけではないが、フィルムが薄くて柔軟なら F_1 は小さいので、台車の移動速度 V_w に応じて回転体を駆動することで、図 2(a) と同様に抵抗力 F_2 を提示できる。また、この方法なら回転体と指の位置は安定で、潤滑剤を用いても指先に付着することはない。更に、回転体の回転速度を変化させることで抵抗力を、フィルムの張力や設置位置を変化させることで対象物の硬さ感覚を変化させることも可



図 3. フィルムと回転体を用いた滑り感覚ディスプレイ.

能である.

3. 滑り感覚ディスプレイの開発

2章で提案した手法を用いて、フィルムと回転体を用いた滑り感覚ディスプレイを開発した。開発したディスプレイの写真を図 3 に示す。幅 80 mm, 奥行き 105 mm, 高さ 51 mm, 重量は 478 g である。4 つの車輪を有する台車型で、車軸はベアリングで保持されており、移動させる時の抵抗は非常に小さい。車軸にはロータリエンコーダ (COPAL, RE12D-300, 分解能 300 p/r) が設置されており、台車の移動速度が計測できる。台車には、直径 30 mm, 幅 30 mm のウレタン樹脂製回転体が設置されている。回転体の回転軸と台車の車軸は平行である。回転体には DC ギャードモータ (キャノンプレジジョン, DG16, 24V, 減速比 1/62) が接続されており、台車の移動速度に応じて回転体の回転速度を制御できる。台車の上面には 30 mm × 44 mm の穴が空いており、その穴の中央に回転体が設置されている。フィルムは、回転体の上部に弛みなく接するように台車の天板に固定した。フィルムは厚さ 0.01 mm のポリエチレンフィルム (以下 PE フィルム) と、厚さ 0.1 mm の天然ゴムシートを用いた。PE フィルムは伸縮性が小さいが、天然ゴムシートは柔らかく伸縮性が大きい。潤滑剤は ISO 粘度グレード 7 の鉱物油を使用した。被験者は、台車の天板の上に手をのせ、穴の部分からフィルムを介して回転体に指を押し付け、台車を移動させる。指の方向は、回転軸と平行、垂直のいずれも可能である。この装置を用いて、4章では抵抗力計測実験を、5章では触感評価実験を行った。

4. 抵抗力測定実験

3章で開発した滑り感覚ディスプレイを用いて、指先に加わる抵抗力を測定する実験を行った。実験の様子を図 4 に示す。計測システムは、AC サーボモータ、ボールねじ駆動リニアガイド、力覚センサ、人の指を模した接触子で構成される。AC サーボモータを制御することで、力覚センサの先端に取り付けられた接触子の上下方向の

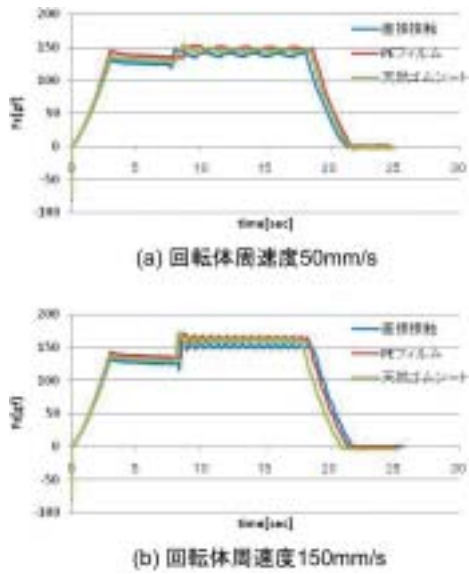


図 4. 抵抗力測定実験の様子

位置を制御できる。接触子は、ウレタン樹脂製で先端の曲率半径 7.5 mm, 幅 15 mm の半円筒型である。6 軸力覚センサを用いることで、接触子に加わる垂直抗力やせん断抵抗力を計測することができる。計測システムの下に開発した滑り感覚ディスプレイを設置し、フィルムなしで回転体と接触子が直接接触した場合、PE フィルムを介して接触した場合、天然ゴムシートを介して接触した場合について実験を行った。回転速度は、回転体の周速度が 50 mm/s の場合と 150 mm/s の場合の 2 種類とした。いずれの場合も潤滑油を使用し、フィルムは回転体の上部に弛みなく接するように設置され、接触子がフィルムの上に接触した位置から下向きに 3 mm 押し込んだ状態で実験を実施した。なお、回転体に対し鉛直上向きを z 方向、回転軸に垂直な方向を y 方向とした。

図 5 に、垂直抗力 F_z の計測結果を示す。図 5(a) は回転体周速度が 50 mm/s の場合、図 5(b) は回転体の周速度が 150 mm/s の場合である。いずれも横軸は時間、縦軸は力を表している。時刻 0 から接触子の押し込みを開始し、押し込み量が 3 mm になったら接触子を停止させ、その後回転体の回転を開始させ、回転を保ったまま接触子を引き上げて実験を終了している。回転体の回転前と回転後のいずれにおいても、直接接触させた場合、天然ゴムシートを介して接触させた場合、PE フィルムを介して接触させた場合の順で僅かに垂直抗力が大きくなっているが、その差は小さく、回転中の垂直抗力はほぼ 150gf であった。回転速度が変化すると、回転に伴う垂直抗力の変化の周期が変わっているが、バラツキの度合いにはほとんど差がなかった。

図 6 に、せん断抵抗力 F_y の計測結果を示す。実験条件や実験方法、グラフの見方は図 5 と同様である。せん断抵抗力は、回転体の回転前はその値が小さかったが、回転を始めると、接触子を直接接触させた場合及び天然ゴムシートを介して接触させた場合においてその値が大き

図 5. 測定結果 (垂直抗力 F_z).

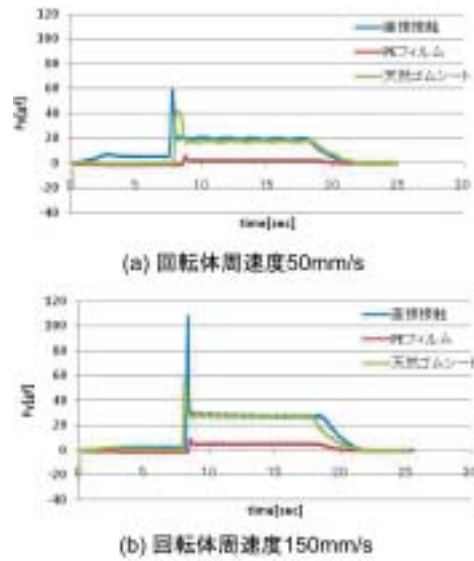
く変化した。これに対し、PE フィルムを介して接触させた場合は、回転開始後もその変化は小さかった。これは、フィルムの伸縮性の違いに起因する。PE フィルムは伸縮性が小さいので、せん断抵抗力が生じててもフィルムの張力がそれを打ち消してしまい、接触子まで伝わらなかった。これに対し、天然ゴムシートは柔らかく伸縮性が高いので、フィルムの張力の影響は小さく、接触子を直接接触させた場合とほぼ同様の抵抗力が計測された。また、回転体の周速度が 50 mm/s の場合の抵抗力は約 20 gf、周速度が 150 mm/s の場合は約 30 gf となっており、回転速度の増加に伴いせん断抵抗力も増加する傾向が見られた。

以上の結果から、フィルムと回転体を用い、フィルムを介して回転体に触れることで、直接回転体に触れた場合と同様の抵抗力を提示できることが確認できた。回転に伴い垂直抗力やせん断抵抗力が細かく変化していることが重要である。また、伸縮性のあるフィルムを用いることで、回転速度に対応したせん断抵抗力が提示可能である。

5. 触感評価実験

開発した滑り感覚ディスプレイを用いた場合の触感評価実験を行った。また、比較のために、回転体を同じ材質のウレタン樹脂プレートをなぞった場合についても同様の実験を行った。図 7 に触感評価実験の様子を示す。図 7(a) はウレタン樹脂プレートなぞり実験の様子を、図 7(b) は滑り感覚ディスプレイ評価実験の様子を示す。

ウレタン樹脂プレートなぞり実験では、厚さ 15 mm のウレタン樹脂プレートを作製し、その表面に潤滑油を十分塗布し、その上を指で直接なぞった場合と、厚さ 0.1

図 6. 測定結果 (せん断抵抗力 F_y).

mm の天然ゴム製手袋をはめてなぞった場合について実験を行った。後に実施する滑り感覚ディスプレイ評価実験と条件をそろえるため、被験者にはイヤホンからホワイトノイズを聞かせ、聴覚情報は遮断した。ウレタン樹脂プレートの上を何度か指でゆっくりなぞった後で、表 1 に示す 10 組の形容詞対について 7 段階で評価させた。被験者数は 6 名で、20 代男性 4 名、30 代男性 1 名、40 代男性 1 名に対し実施した。



(a) ウレタン樹脂プレートなぞり実験



(b) 滑り感覚ディスプレイ評価実験

図 7. 触感評価実験の様子。

表 1. 触感評価実験評価指標

すべすべ ⇔ ざらざら	しっとりした ⇔ 乾いた
凹凸 ⇔ 平ら	ぬるぬる ⇔ さらさら
きめの粗い ⇔ きめの細かい	粘る ⇔ 滑る
滑らか ⇔ 引っかかる	硬い ⇔ 柔らかい
抵抗感のある ⇔ 抵抗感のない	弾力あり ⇔ 弾力なし

図 8 に、ウレタン樹脂プレート触感評価実験の結果を示す。10 組の形容詞対の中から、差が見られる 5 組について各被験者の評価を平均して示した。図中の菱形は直接指を接触させた場合、四角印は手袋を着用して接触した場合を示す。「滑らか—引っかかる」、「抵抗感のある—抵抗感のない」、「ぬるぬる—さらさら」の項目で差が見られた。潤滑油の粘度が低かったため、直接触れても濡れている感じやさらさら感を感じるが、粘性は感じなかった。逆に、直接接触で少し押し付け力を大きくすると、抵抗感や引っかかり感が感じられた。一方手袋を着用することで、引っかかり感の減少、抵抗感の減少、ぬるぬる感を感じるようになった。

滑り感覚ディスプレイ触感評価実験では、開発した滑り感覚ディスプレイを用いて、指は回転体の回転軸と平行とし、天然ゴムシートを介して回転体に指を押し付けながら台車を左右に移動させた。このディスプレイはモータの動作音がするため、被験者にはイヤホンからホワイトノイズを聞かせ、聴覚情報は遮断した。台車の慣性力を感じぬように台車はゆっくりとできるだけ一定速度で移動させ、方向を切り替える際には一端停止させ、何度か左右に移動させた。回転体の回転速度は、停止させた場合と、台車の移動速度と同じせん断速度を提示できるように回転させた場合の 2 種類とした。

図 9 に、滑り感覚ディスプレイ触感評価実験の結果を示す。形容詞対は 5 組で、図中の三角印が回転体停止の場合、菱形が回転させた場合の評価の平均を示す。回転体が停止している場合については、指を動かしている運動感覚は得られるものの、指先でなぞっている感覚が得られず、皮膚感覚に関する「すべすべ—ざらざら」や「ぬるぬる—さらさら」において、どちらでもないという

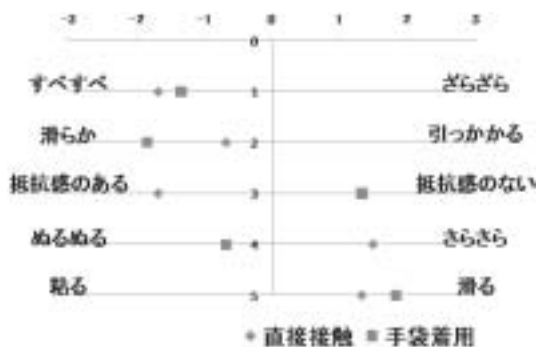


図 8. ウレタン樹脂プレート触感評価結果.

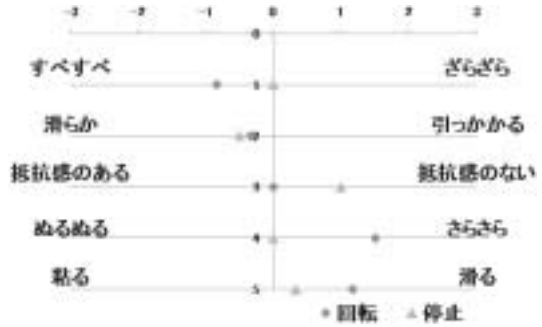


図 9. 滑り感覚ディスプレイ触感評価結果.

回答が多く、滑り感覚は得られなかった。これに対し、回転体を回転させることで、すべすべ感やさらさら感、滑る感覚などの評価が高くなった。この結果から、細かく変化する抵抗力を提示することが、滑り感覚の提示にとって重要であると言える。

6. おわりに

本研究では、触知覚運動の一つである滑り感覚の提示を目的とし、特に滑りやすい物体に直接指で触れて滑らせている感覚を提示するために、フィルムと回転体を用いた滑り感覚ディスプレイを提案した。

受動的に動かすことのできる台車に回転体として円筒ローラを装着し、台車の移動速度に応じて回転速度を制御し、フィルムを介して回転体に触れる触覚ディスプレイを開発した。回転体の回転により指先に加えられる抵抗力について、計測システムを用いて実験的に検証した。伸縮性のあるフィルムを介して回転体に接触することで、直接接触した場合と類似した抵抗力が提示可能であり、回転体の回転速度により提示できる抵抗力を変化させることができることを確認した。

開発した触覚ディスプレイを用いて触感評価実験を行った。伸縮性のあるフィルムを介して回転体に触れ、台車の移動速度に応じてローラを回転させ抵抗力を提示することで、潤滑剤を塗布したウレタン樹脂プレートを手袋をしてなぞった場合に似た滑り感覚を提示できることを確認した。

参考文献

- 1) 石井克典, 増田良介: 圧力・すべり提示機能をもつロボットハンド操作デバイスの開発, 日本ロボット学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'01, 1A1-C5 (2001).
- 2) 佐伯航太, 黒柳和夫, 田中真二, 高橋秀智: なぞり感を提示するホイール型触覚ディスプレイの感覚マップを用いた基本特性評価, 日本バーチャルリアリティ学会第 13 回大会論文集, (2008) pp. 142-145.
- 3) 横田秀彰, 山本晃生, 山本弘明, 樋口俊郎: 静電触感

- ディスプレイにおける粗さ感と柔らかさ感の統合提示機構の開発, 日本バーチャルリアリティ学会第11回大会論文集, (2006) pp. 181-184.
- 4) 佐野明人, 西恒介, 宮西英樹, 藤本英雄: 触覚情報に基づく遠隔臨場感多指ハンドシステムの構築, 計測自動制御学会論文集, Vol. 40, No. 2, (2004) pp. 164-171.
 - 5) L. Winfield, J. Glassmire, J. E. Colgate, M. Peshkin: T-PaD: Tactile Pattern Display through Variable Friction, Proc. WorldHAPTICS 2007, (2007) 421-426.
 - 6) 坂口正道, 岡本尚也, 荒田純平, 藤本英雄: 滑らない滑り感覚ディスプレイの開発に関する研究, 日本バーチャルリアリティ学会第13回大会論文集, (2008) pp. 475-476.
 - 7) 岡本尚也, 坂口正道, 荒田純平, 藤本英雄: 回転体とフィルムを用いた滑り感覚ディスプレイの開発に関する研究, 計測自動制御学会第9回システムインテグレーション部門講演会 (SI2008), (2008) pp. 963-964.