



# 指のせん断変形を考慮した 滑り摩擦の力覚インタラクション

石田亮太<sup>1)</sup>, 三武裕玄<sup>1)</sup>, 長谷川晶一<sup>1)</sup>

1) 東京工業大学 (〒226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259, info@haselab.net)

**概要:** 本研究では、指紋の形状変化によって遷移する摩擦分布を考慮した指の滑り摩擦の力覚インタラクションを提案する。バーチャル物体を擦る際の摩擦感をより現実の摩擦感に近づけるためには、指紋による凹凸や柔軟性を再現する必要がある。そのため、バーチャル空間内の指モデルに指紋の形状を考慮し、実際の滑り摩擦に起きうる Pre-Sliding や Stick-Slip 現象をリアルタイムで再現する。

**キーワード:** 力触覚-ソフトウェア, インタラクションデザイン, 滑り摩擦

## 1. はじめに

物体の材質感を得る際の重要な要素として、摩擦が挙げられている[1]. そのため、触覚を通して、仮想環境下における材質感を向上させるには、より現実に近い力を提示する必要がある。本研究では、指を物体上で滑らせた際に生じる滑り摩擦に焦点を当てる。指の滑り摩擦には、皮膚が隆起してできた 0.4[mm]程度の凹凸である指紋が影響している[2]. そのため、仮想環境下において、指の滑り摩擦のリアリティの向上のためには、指モデルに指紋を考慮する必要があると考えられる。現実の指は指紋によって、複数点で物体と接触しているため、Pre-Sliding が起きうる。Pre-Sliding とは、Stick 状態(固着状態)から Slip 状態(滑り状態)に遷移する際に、接触点によって Stick 状態である点と Slip 状態である点がそれぞれ存在する現象を示す。この現象により、接触点が一点の物体や剛体に比べ、物体が Stick 状態から全体が Slip 状態に変化するまでの時間が長くなり、指の加速度変化が緩やかになると考えられる。本研究では、仮想環境下における指モデルに指紋を考慮し、リアルタイムで指の滑り摩擦によって生じる力を提示する力覚インタラクションを提案する。

## 2. 関連研究

前野らは、指紋の断面形状を測定し、その結果をもとに有限要素法を用いて指紋の二次元断面モデルを作成した[2]. このモデルをもとに、指紋一つについて滑り摩擦の解析を行ったところ、指紋の形状は台形や円弧の場合よりも、ひとつの指紋全体が固着から滑りへと急激に変化するこ

とを明らかにしている。井垣らは、前野らの指紋モデルを参考に三角形要素を用いた有限要素法により指紋モデルを作成した[3]. そして、柔軟な指紋と平面間の Stick-Slip 現象を考慮した滑り摩擦についてのシミュレーションを行い、指紋全体が Stick 状態から Slip 状態に遷移する際に、外側の接触点から徐々に滑り始めていく Pre-Sliding を再現している。これらの方法では、指紋を考慮した指の滑り摩擦についてのシミュレーションを行い、実際の滑り摩擦で起きうる Pre-Sliding や Stick-Slip 現象を再現できているが、柔軟な指紋の変形計算において計算コストが高くなってしまっており、リアルタイムでのシミュレーションは厳しいとされている。

Perez らは、Leap Motion[4]によってユーザーの手をトラッキングし、Jacobi 法を用いた変形計算の手法を用いることで、変形を考慮した多指の三次元力覚インタラクションを提案している[5]. この手法は変形計算の計算コストが小さく、リアルタイムでの三次元シミュレーションに優れているとはいえるが、Leap Motion で得られた手のモデルを用いていることから指紋を再現できていない。また、幾何学的なアルゴリズムを用いていることから、摩擦力が力学的に正しいとはいえないことが問題点とされている。

本研究では、一つの細かい指紋に着目するのではなく、指全体のせん断変形に着目し、複数点で接触する二次元指モデルを作成することで、実時間での変形シミュレーションを可能にし、指の滑り摩擦についての力覚インタラクションを提案する。

Ryota ISHIDA, Hironori MITAKE, and Shoichi HASEGAWA

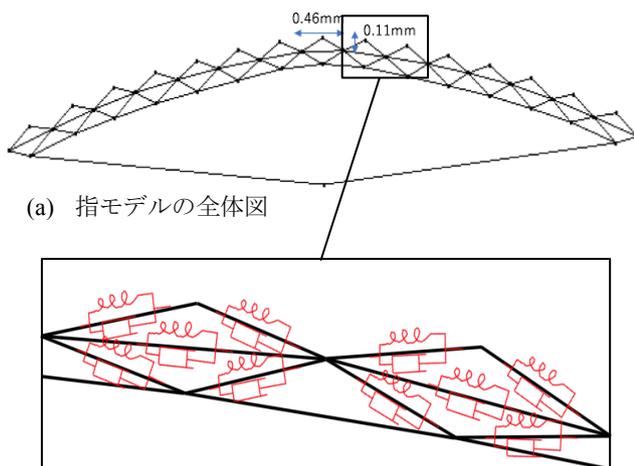
### 3. 提案

#### 3.1 指紋を考慮した指モデル

前野らの実験結果[2]から、滑り摩擦において指紋一つについては接触点全てが固着状態から滑り状態に急激に変化することが明らかにされている。これは、接触面の法線反力が均一に分布するため、接触点が同時に滑ることが原因である。この結果から、本研究ではそれぞれの指紋を一つの点と簡略化し、図 1(a)のような指モデルを作成した。指紋の大きさについては、前野らの計測した結果[2][6]をもとに、幅は 0.46mm、高さは 0.11mm とした。また、それぞれの指紋は従属であるため、隣り合う指紋を中間層により接続し、さらに骨の役割を担う固定点に中間層を接続することで簡略化した指モデルを作成した。

#### 3.2 指モデルの変形計算

指モデルの変形計算には、質点バネダンパモデルを用いる。質点間にバネダンパモデルをそれぞれ接続し、図 1(b)のようなモデルを考える。骨の役割を担う固定点は、変形計算の際は動かさず、固定点にバネダンパモデルで接続されている点に力を加える。



(a) 指モデルの全体図

(b) 指紋部分の詳細図

図 1 : 提案する指モデル

#### 3.3 摩擦の力覚レンダリング

抗力は、接触点と固定点との間にバネダンパモデルを設置することで求める。固定点-接触点間にそれぞれバネダンパモデルを設置し、バネダンパモデルの弾性力を固定点に加え、全ての固定点に加わる合力を指全体の抗力とする。摩擦判定は、Pre-Sliding を再現するため、それぞれの接触点で行う。すなわち、それぞれの接触点でバネダンパモデルによって求められた抗力と静止摩擦係数を掛け合わせることで各点における摩擦力を計算し、摩擦判定を行う。静止摩擦係数については、固着時間に依存する時変摩擦係数を用いる。Dieterich らは、摩擦係数が時間に依存することを実験的にモデル化し、

$$\mu_s = \mu_d + A \log_{10}(Bt + 1) \quad (1)$$

とした[7]。本研究では、この式を静止摩擦係数に用い、実装を行なった。ここで、A と B は定数、 $\mu_d$  は動摩擦係数である。また、接触点における摩擦による拘束を考えると、Stick 状態から Slip 状態への遷移は、

$$|m\ddot{x}_0 + b(\dot{x}_0 - \dot{x}) + k(x_0 - x)| > \mu_s F_N \quad (2)$$

を満たす際に起きる。ここで、m、 $x_0$  はそれぞれ質点の質量と位置であり、b、k はダンパ係数、バネ係数、x はグリッパ位置、 $F_N$  は法線力、 $\mu_s$  は静止摩擦係数である。Slip 状態から Stick 状態への遷移は、

$$|m\ddot{x}_0 + b(\dot{x}_0 - \dot{x}) + k(x_0 - x)| < \mu_d F_N \quad (3)$$

を満たす際に起きる。 $\mu_d$  は動摩擦係数である。また Stick 状態から Slip 状態に遷移する際に指先で振動が発生する[8]。この振動は池田ら[9]の作成したモデルを利用し、

$$Q(t) = A\mu_s W e^{-Dt} \sin(\omega t) \quad (4)$$

という振動モデルを指モデルの接触点全てが Slip 状態に遷移した瞬間に接線方向に加える。このとき、振幅係数を A、静止摩擦係数を  $\mu_s$ 、接触点全体の垂直荷重を W[N]、固着時間を t[ms]、角速度を  $\omega$ [rad/s]、減衰係数 D とする。

### 4. 実装

本研究では、佐藤誠ら[10]によって開発された力覚インタフェース SPIDAR を用い、力覚インタラクションを構築した。SPIDAR は、物体モデルの形状を繊細に提示することができ、広い帯域の振動を提示できることから、指の滑り摩擦で生じる力と振動を VR 上で高精度に再現することを期待できるので、本研究に用いた。構築したシステムは図 3 に示す。プログラムを実行すると、SPIDAR のグリッパに連動した指モデルと平面が OpenGL によって描画される。SPIDAR のグリッパを動かすことで、指モデルを動かすことができ、この指モデルを平面上で滑らせることで、滑り摩擦によって生じる力と振動を SPIDAR に出力し、提案したモデルをユーザーの指先に提示する。

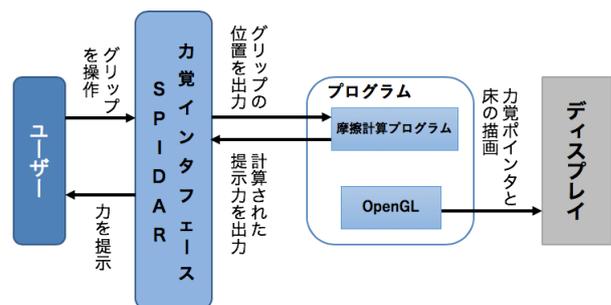


図 3 : 提案システムの構成図

## 5. まとめ

本研究では、指紋を考慮した指モデルと質点バネダンパモデルを用いることで、指紋を考慮した指の滑り摩擦の力覚インタラクションについて示した。評価としては、現実の指と指モデルの進行方向の加速度を測定し、加速度波形を比較することを考えている。また実際の摩擦感については、被験者に接触点が一点の指モデルと提案した複数点接触のモデルのシステムをそれぞれ体験してもらい、現実の摩擦感に近いほうを選んで頂き、評価することを考えている。今後の展望としては、滑り摩擦についての様々な材質感の再現、重要とされている材質感次元における摩擦の重要性の検証が挙げられる。

**謝辞** 日常の議論を通じて多くの知識や示唆を頂戴しました長谷川晶一研究室の皆様へ深く感謝致します。

### 参考文献

- [1] 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論文集, Vol.16, No.3, pp. 343-353, 2011.
- [2] 前野隆司, 山田大介, 佐藤英成:「ヒト指紋形状の力学的意味」, 日本機械学会論文集 C 編, 71 巻, 701 号, pp. 245-250, 2005.
- [3] 井垣友貴, 田川和義, 田中弘美, :「指紋の変形に基づく Stick-Slip シミュレーション」, 情報処理学会第 79 回全国大会講演論文集, pp. 93-94, 2017.
- [4] Leap Motion: <https://www.leapmotion.com/>
- [5] Alvaro G.Perez, Gabriel Cirio, Daniel Lobo, Francesco Chinello:”Efficient Nonlinear Skin Simulation for Multi-Finger Tactile Rendering”, HapticSymposium,pp155-160,2016
- [6] 前野隆司, 小林一三, 山崎信寿:「ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学的関係」, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 1, No. 2, pp. 201-206, 1996.
- [7] J. H. Dieterich:”Modeling of rock friction: 1. experimental results and constitutive equations,Journal of Geophysical Research”: Solid Earth, Vol.84, No.B5,pp2161-2168, 1979
- [8] 田所千治:「すべり摩擦に現れる振動の抑制に関する基礎研究」,横浜国立大学大学院, 2014
- [9] 池田有冬, 稲見昌彦, 長谷川晶一:「抗力への振動付加による高剛性とすべり感提示」,日本バーチャルリアリティ学会大会論文集 13th,2008
- [10] Jun Murayama1, Laroussi Bougrila, YanLin Luo Katsuhito Akahane, Shoichi Hasegawa, B’eat Hirsbrunner,Makoto Sato:”SPIDAR G&G: A Two-Handed Haptic Interface for Bimanual VR Interaction”, Euro-Haptics,pp138-146,2004