

指紋の変形に基づく Stick-Slip シミュレーション

井垣 友貴[†] 田川 和義[‡] 田中 弘美[†]立命館大学情報理工学部[†]立命館大学 立命館グローバル・イノベーション研究機構[‡]

1 はじめに

ヒトの指が物体をなぞるときの触感には摩擦が大きく影響している。そこで、近年普及が進んでいる仮想環境下においても、物体をなぞったときの摩擦感を呈示することが求められている。

ヒトは皮膚表面の動的な変形を知覚して、摩擦情報を得ていると考えられている[1]。指で物体をなぞった際の皮膚表面の動的な変形の例として、物体に対して皮膚が固着と滑りを繰り返す Stick-Slip 現象がある。昆陽らは実際の指に起こる Stick-Slip 現象を観察し、Stick-Slip 現象による振動をバネダンパモデルに近似を行い、振動子を用いて指に呈示することで摩擦感を再現した[2]。

物体をなぞる際の摩擦感のリアリティの向上のためには、指紋を考慮する必要があると考えられる。指紋とは皮膚が隆起してできた 0.4-0.5[m] 程度の大きさの凹凸である。一般に指紋は皮膚と物体との摩擦力を大きくし、把持力を大きくするものと考えられてきた。しかし、実際には物体との接触面積を小さくするため、摩擦力を小さくすることが確認された[3]。また、指紋は摩擦感をより敏感にしていると考えられている。前野らは、指紋を有する指の二次元断面の有限要素モデルを作成し、指紋の形状が指紋の滑りを触覚受容器で検出・生成しやすい形状になっていることを明らかにした[4]。

指紋によって摩擦感が増幅されることから、仮想環境内のオブジェクトをなぞった際の触感のリアリティを向上させるには、対象物に接触した際の指先に存在している指紋の Stick-Slip 現象をシミュレートする必要がある。そのためには、柔軟な指紋モデル、対象物との接触モデル、Stick-Slip 現象を考慮した摩擦モデルが必要となると考えられる。本稿では、接触する対象物を一様な平面とし、柔軟な指紋と平面間の Stick-Slip 現象を

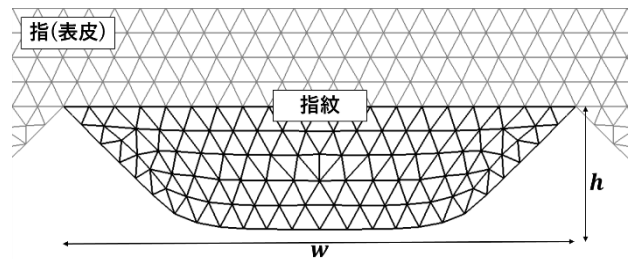


図 1. 指紋モデル(指(表皮部分)を含む)

考慮した接触・滑りのシミュレーションモデルについて提案する。

2 シミュレーションモデル

指紋と平面間の Stick-Slip 現象のシミュレーションを行うためには、柔軟な指紋モデルと平面との接触モデル、Stick-Slip 現象を考慮した摩擦モデルが必要となる。本節では、指紋-平面間の Stick-Slip シミュレーションについて提案する。

2.1 指紋モデル

指紋モデルは前野らの研究[4]を参考に作成を行う。前野らは四角形 1 次要素で指紋を含む指の断面の有限要素モデルを作成したが、本研究では、四角形要素に比べて作成が容易である三角形要素を用いて指紋モデルを作成する。しかしながら、三角形要素は四角形要素に比べて精度が低くなる欠点がある。本研究では、三角形 1 次要素ではなく三角形 2 次要素を用いることで精度の向上を図る。作成した指紋モデルの形状を図 1 に示す。形状や大きさについては、前野らが計測した結果[4]をもとに $w = 0.46[\text{mm}]$, $h = 0.11[\text{mm}]$ とする。柔軟な指紋モデルの変形計算の手法としては、質点ばねを用いた方法と有限要素法を用いた方法が挙げられる。本研究では、より精度の高い変形計算を行うために有限要素法を用いて動的なシミュレートを行う。指紋モデルの物理パラメータは小林らの測定結果[5]を用いて決定する。指紋のヤング率は $136[\text{kPa}]$ 、ポアソン比は 0.48 とする。質量密度は $1.1 \times 10^{-6}[\text{kg}/\text{mm}^3]$ とする。指紋の減衰係数については測定した例がないため、指に対して計測を行った研究[6]を参考に決定する。つまり、減衰行列と剛性行列の比である構造減衰定数値を $0.02[\text{s}^{-1}]$ とし、剛性行列から減衰行列を決定するようにする。また、本シミュレーション

Real-Time Simulation of Stick-Slip Sliding with Epidermal Ridges on Fingertips

[†]Yuuki Igaki, Hiromi T.Tanaka

College of Information Science and Engineering,
Ritsumeikan University

[‡]Kazuyoshi Tagawa

Global Innovation Research Organization
Ritsumeikan University

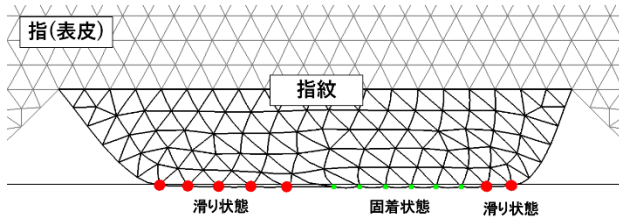


図 2. 指紋モデル(指(表皮部分)を含む)

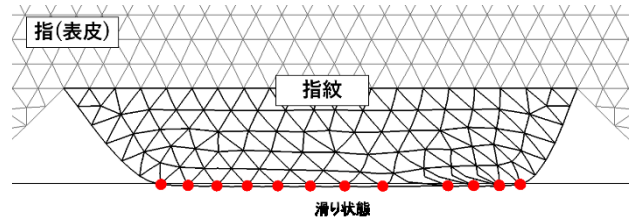


図 3. 指紋モデル(指(表皮部分)を含む)

では、指紋と指の表皮の接続部分を固定し、指紋部分だけ変形計算を行う。

2.2 接触モデル

平面と接触する節点には、ペナルティ法による境界条件を導入する。すなわち、平面と接触した節点に対して、平面への侵入量に応じたペナルティとなる力を法線方向の外力として節点に与える。

2.3 摩擦モデル

本研究では Stick-Slip 現象を考慮した摩擦の表現のために、凝着説を取り入れたモデルを用いる。指紋を構成する節点が平面に接触した場合、接触している節点は平面に拘束され、平面と一緒に運動する。接触している節点にかかる法線方向の力(法線力)と接線方向の力(接線力)を計算し、法線力と接線力の比が静止摩擦係数を超えると拘束が外れて運動するものとする。拘束が外れ、滑り状態となった節点に対しては動摩擦力を外力として与える。

2.3 結果

シミュレーション結果を図 2, 図 3 に示す。平面を指紋に $0.025[\text{mm}]$ 押し込んで、接線方向に移動させた。平面の移動速度は $10.0[\text{mm/s}]$ 、静止摩擦係数、動摩擦係数ともに 1.0 とした。1秒を 500STEP に分割し、シミュレーションを行った。3STEP目の変形の様子を図 2 に示す。平面に接触する節点が固着状態であるものと、滑り状態であるものが存在している。5STEP目の変形の様子を図 3 に示す。3STEP目では固着状態であった節点が滑り状態に遷移し、接触している節点すべてが滑り状態になっている。

2.3 考察

平面と接触している節点について、平面が移動するとともに固着状態から滑り状態へ遷移していき、すべての接触節点が滑り状態に遷移している。このあと、滑り状態からまた固着状態へ遷移し、同様の現象を繰り返す。このことから Stick-Slip 現象をシミュレートできていると考えられる。

3 まとめと今後の課題

本稿では、柔軟な指紋と平面間の Stick-Slip 現象を考慮した接触・滑りのシミュレーションモデルについて示した。

また、更なる課題として、本シミュレーションの高速化が挙げられる。対象物に接触した際の指紋の Stick-Slip 現象のシミュレーション結果から指紋部分の Stick-Slip 現象を実時間で呈示するには高い更新レートが必要となる。しかしながら、指紋はとても細かく、指腹部に数多く存在しているため、指先には指紋が多く存在しており、メッシュを用いた柔軟な指紋の変形計算において計算コストが高くなるのが問題として考えられる。この問題を回避する方法として、あらかじめ記録された計算結果に基づいて再生する手法[7]を用いることが挙げられる。すなわち、指紋にかかる圧力や速度、移動方向に応じて指紋に生じる挙動をあらかじめ計算、記録しておき、それをもとにリアルタイムで指紋の挙動を生成する。今後は、記録再生のアプローチをもとにした、指紋-対象物間の Stick-Slip シミュレーションの高速化の手法の提案を行う。

4 参考文献

- [1] 前野隆司, 「ヒトの触覚受容機構 一力学・アナロジー・錯覚という視点から一」, 電気学会センサマイクロマシン部門誌, Vol. 122-E, No. 10, pp. 469-473, 2002.
- [2] 山田浩史, 昆陽雅司, 岡本正吾, 田所諭, 「Stick-Slip 現象に基づく振動刺激を用いた摩擦感呈示法」, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概論集 2008, 1A1-H21, 2008.
- [3] Peter H. Warman and A. Roland Ennos, “Fingerprints are unlikely to increase the friction of primate fingerpads.” J. Exp. Biol, 212 pp. 2016-2022, April 2009.
- [4] 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, 2005.
- [5] 小林一三, 前野隆司, 山崎信寿, 「ヒト指腹部構造と触覚受容器の力学的関係」, 日本機械学会論文集(C編), vol. 67, No. 607, pp. 881-888, 1997.
- [6] A. Z. Hajian, R. D. Howe, 「Identification of the Mechanical Impedance at the Human Finger Tip」, Trans, ASME, J. Biomech. Eng, vol. 199, pp. 109-114, 1997
- [7] 田川和義, 広田光一, 廣瀬通孝, 「力覚インタラクションのための動的変形モデル」, 電子情報通信学会論文誌, vol. J90-D No. 9, pp. 2615-2623 2007.