



指紋を有する指先の Stick-Slip シミュレーション

Instructions Simulation of a stick-slip phenomenon of a fingertip with fingerprints

田川和義¹⁾²⁾, 井垣友貴²⁾, 田中弘美²⁾

Kazuyoshi TAGAWA, Tomoki IGAKI, and Hiromi T. TANAKA

1) 愛知工科大学 工学部 (〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2, tagawa@tagawalab.org)

2) 立命館大学 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1, {tagawa, igaki, hiromi}@cv.ci.ritsumeai.ac.jp)

概要: 織物のような表面微小構造が非一様で複雑な仮想柔軟物などに触れたときの触感を提示できれば、遠隔ショッピングなどで有効である。ヒトの指腹部には指紋が存在し、指を物体表面に触れて滑らせた際に、指紋に固着・滑りを繰り返す Stick-Slip 現象による振動が生じる。これにより、ヒトは物体表面の微小な粗さによる触感を認識している。そのため、指先で物体に触れた際の触感を再現するには、指先に生じる Stick-Slip 現象による指紋の変形・振動を求める必要がある。そこで本発表では、指紋を有する指先の Stick-Slip シミュレーションを作成し、その評価を行ったので報告する。

キーワード: 柔軟手シミュレーション, 力触覚インタラクション, Stick-Slip 現象

1. はじめに

近年、織物のような表面微小構造が非一様で複雑な仮想柔軟物などに触れたときの触感を提示する研究が進められている。

ヒトの指腹部には指紋が存在しており、指を物体表面に触れて滑らせた際に、指紋に固着・滑りを繰り返す Stick-Slip 現象による振動が生じることで、ヒトは物体表面の微小な粗さによる触感を認識している[1]。そのため、指先で物体に触れた際の触感を再現・提示するためには、指先に生じる Stick-Slip 現象による指紋の変形・振動を求める必要がある。

脇田らは、比較的大きな凹凸形状を有する織物に触れた際の反力を、テクスチャベースのアルゴリズムで計算・力覚提示する方法を提案している[2]。しかし、織物の表面の微小構造や、指先の指紋は考慮されていない。昆陽らは、布のような手触り感覚を呈示する触覚ディスプレイを提案している[3]。しかし、織物と指先間の Stick-Slip シミュレーションは行われていない。

そこで筆者らは、指紋を有する指先の Stick-Slip シミュレータを構築した。本シミュレータを用いて、様々な物体の表面粗さに起因する触感情報を生成することを目標としている。本報告では、本シミュレータの概要を述べるとともに、本シミュレータで変形・振動を求めた結果と、その評価結果について報告する。

2. 指紋を有する指先の Stick-Slip シミュレーション

2.1 指先の二次元断面モデル

本研究では、図 1 に示す指先の二次元断面モデルをシミュレーションに用いる。本モデルは指紋、表皮、真皮、皮下組織、爪から構成される。指先と指紋の形状および大きさについては、前野らの計測結果[3]に基づき、指の横幅を 17.44mm、縦幅を 13.60mm、指紋の横幅を 0.46mm、縦幅を 0.11mm とした。物理特性については、同様に前野らの計測結果[3]に基づき、指紋、表皮、真皮、皮下組織、爪のヤング率をそれぞれ 0.136MPa, 0.136MPa, 0.08MPa, 0.34MPa, 142.1MPa, ポアソン比を 0.48, 質量密度を $1.1 \times 10^{-6} \text{kg/mm}^3$ とした。

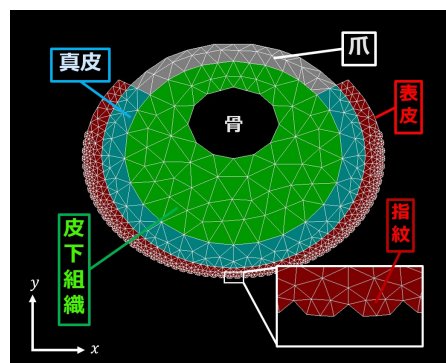


図 1: 指先の二次元断面モデル。

2.2 指先の変形・Stick-Slip シミュレーション

本研究では、変形モデルとして幾何学的非線形性を考慮可能な有限要素法（共回転系変形モデル）を用いる。これにより、回転を伴う大変形に対応することができる。

さらに本研究では、以下の手順にて Stick-Slip 現象を考慮した接触・摩擦計算を行う。

Step 1: 時刻を微小時間 Δt だけ進める。

Step 2: 各節点について、Step 3～Step 8を行う。

Step 3: 触対象物との接触判定を行う。

- ・触対象物内部にある場合は Step 4 へ。
- ・触対象物外部にある場合は節点の状態を非接触状態として、Step 7 へ。

Step 4: 1ステップ前の各節点の状態が固着状態の場合は Step 5 へ、滑り状態の場合は Step 6 へ

Step 5: 式(1)を満たしている場合は節点の状態を固着状態、満たしていない場合は節点の状態を滑り状態として、Step 7 へ

$$|\mathbf{f}_t| \leq |\mu_s \cdot \mathbf{f}_n| \quad (1)$$

ここに、 \mathbf{f}_t 、 \mathbf{f}_n 、 μ_s はそれぞれ、接線力、法線力、静止摩擦係数である。

Step 6: 式(2)を満たしている場合は節点の状態を固着状態、満たしていない場合は節点の状態を滑り状態とする。

$$\dot{\mathbf{u}}_t \approx \mathbf{V} \quad (2)$$

ここに、 $\dot{\mathbf{u}}_t$ 、 \mathbf{V} はそれぞれ節点の速度ベクトル、触対象物体の速度である。

Step 7: 法線方向の接触処理を行う。

非接触時状態：特に何も処理しない。

固着状態・滑り状態：微小時間 Δt の間、変形した触対象物体に合わせて固定位置を変更する。

Step 8: 接線方向の接触（摩擦）処理を行う。

非接触時状態：特に何も処理しない。

固着状態：微小時間 Δt の間、変形した触対象物体に合わせて固定位置を変更する。

滑り状態：式(3)から求められる動摩擦力を外力として与える。

$$\mathbf{f}_t = \frac{v_t}{|v_t|} \mu_k \cdot |\mathbf{f}_n| \quad (3)$$

Step 9: 有限要素解析を行う。

Step 10: 接触状態にある節点の反力を計算する。

Step 11: 次の時刻に進む(Step 1に戻る)。

3. 実験

3.1 実験内容

前章にて述べた手法の妥当性を評価するため、過去の研究[4][5]より明らかとなっている、指先・指紋に生じる以下の挙動がシミュレーションでも再現できるかを確認した。

1) 接触面に局所的な固着・滑りが発生する。

2) 速度が 30mm/s（触知の速度）以下では、指紋に生じる振動周波数は 0～60Hz である。

3) 速度が高速になると、指先表面に生じる振動周波数も高くなる。

シミュレーションの条件は山田らの計測[5]と同様とした。骨の節点には固定境界条件を与えて、平面を垂直方向に 0.1s かけて 1.0mm 押しこんでから、水平方向に一定速度で移動させ、2s までシミュレーションを行った。平面速度は、ヒトが物体に触れて触感を確認する際のなぞり動作の速度を考慮して、5.0mm/s、10.0mm/s、15.0mm/s、20.0mm/s、25.0mm/s、30.0mm/s の 6 通りとした。静止摩擦係数は 1.0、動摩擦係数は 0.5 とした。

また、指腹部の先端の指紋表面を構成する節点の 1 つを計測点とし、計測点の x 座標を 100 ステップごとに記録し、0.987～2.000s までの 1024 個の x 座標値をフーリエ変換した結果の振幅スペクトルが最大となる周波数を計測点の振動周波数とした。また、実験に用いた計算機環境は、CPU: Intel Core i7-6850K 3.60GHz、GPU: NVIDIA GeForce GTX 1080Ti、Memory: 16.0GB、OS: Windows10 Enterprise、Compiler: Visual C++で、描画には OpenGL を用いた。有限要素法におけるベクトル・行列積の計算には GPU および NVIDIA の行列演算ライブラリ[6]を用いた。

3.2 実験結果

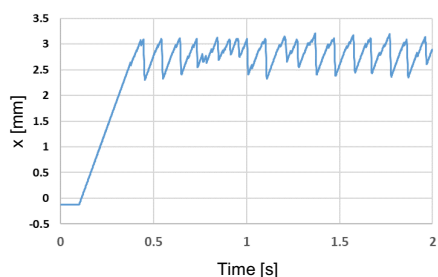
図 2 に各速度での計測点の座標値の時間的変化の様子を、図 3 に平面速度と振動周波数との関係を、図 4 に平面速度が 25mm/s における変形・滑りの様子を示す。

図 4 より指紋の接触部分に局所的な固着・滑りが発生しており、また、図 2 より Stick-Slip 現象による振動が生じていることがわかる。また、図 3 より振動の周波数も 0～60Hz の範囲に収まっていることがわかる。加えて、図 3 より、平面速度が速くなるほど振動周波数が高くなっていることがわかる。以上により、上記の 3 つの条件を全て満たすことになり、シミュレーション結果の妥当性が示された。なお、1 ステップのシミュレーションに要した時間は計算時間は 16.7 ms であった。

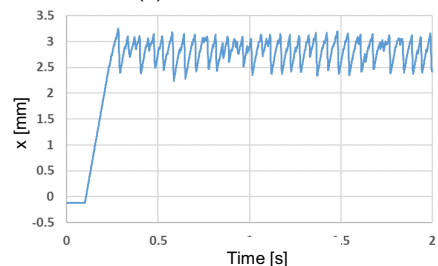
4. まとめ

本報告では、指紋を有する指先の Stick-Slip シミュレータを実現するために、指紋を有する指先断面モデル、非線形性を考慮した変形モデルと Stick-Slip 現象を考慮可能な接触・摩擦シミュレーション手法を考案した。指紋を有する指先断面の Stick-Slip シミュレータを構築し、評価実験により実世界での挙動に近いシミュレーションが可能であることを確認した。

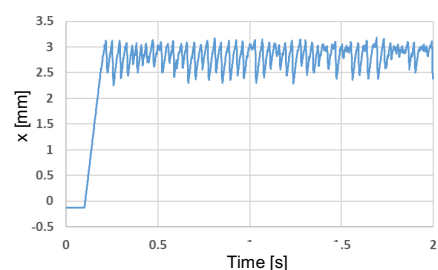
今後は、複雑な微小構造を持つ実物体との接触時の変形・滑りの様相を計測し、これを指標とすることで、シミュレータの精緻化を図っていきたい。加えて、記録再生型変形計算手法[7]を適用することで、シミュレーションの高速化も図っていききたいと考えている。



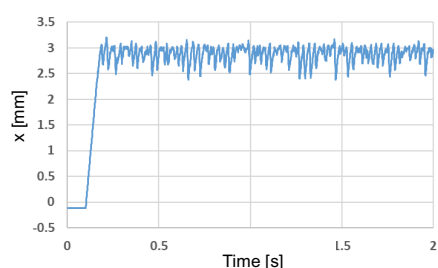
(a) 速度が 5mm/s の時



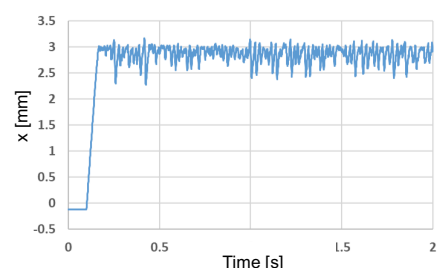
(b) 速度が 10mm/s の時



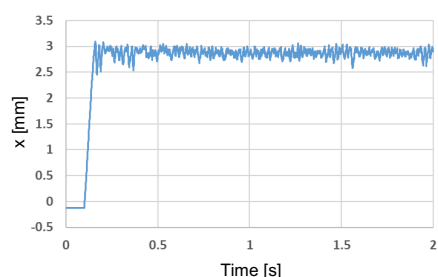
(c) 速度が 15mm/s の時



(d) 速度が 20mm/s の時



(e) 速度が 25mm/s の時



(f) 速度が 30mm/s の時

図 2: 各速度での計測点の x 座標

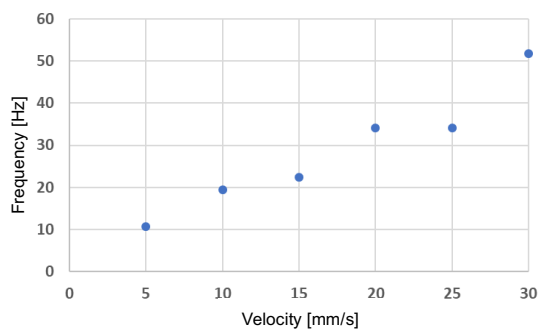
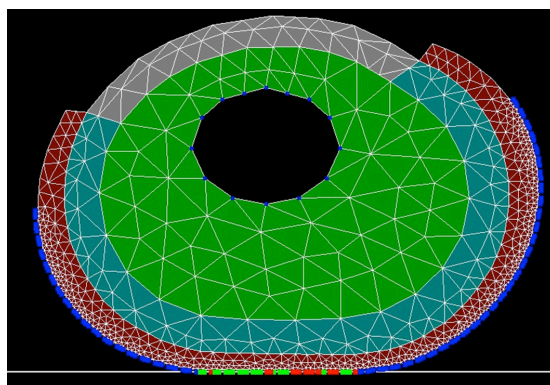


図 3: 平面速度と振動周波数との関係

図 4: 速度が 25mm/s における変形・滑りの様子
(赤色: 固着状態, 緑色: 滑り状態)

謝辞 本研究の一部は JSPS 科研費 JP17H00754 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] 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, Vol.71, No.701, pp.245-250, 2005.
- [2] Wataru Wakita and Hiromi T. Tanaka, "A Digital Archiving for Large 3D Woven Cultural Artifacts Exhibition," ITE Transactions on Media Technology and Applications, Vol.2, No.3, pp.236--247, 2014.
- [3] 昆陽雅司, 田所 諭, 高森 年, 小黒啓介, 徳田献一: 「高分子ゲルアクチュエータを用いた布の手触り感覚を呈示する触感ディスプレイ」, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.6, No.4, pp.323-328, 2001.
- [4] 小林一三, 前野隆司: 「ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学的関係 第 3 報 凹凸を有する面と指の接触解析結果」, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.65, No.636, pp.3321- 3327, 1999.
- [5] 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要集, pp.1-4, 2008.
- [6] The API reference guide for cuSPARSE, the CUDA sparse matrix library, Retrieved July 22, 2019, from <https://docs.nvidia.com/cuda/cuspars/index.html>

- [7] Kazuyoshi Tagawa, Koichi Hirota, Michitaka Hirose, "Impulse Response Model: an Approach to Haptic Interaction with Dynamically Deformable Object", Proc. of IEEE Int. Conf. on Haptics 2006 (IEEE Haptics2006), pp.209-216, 2006.