



固着滑りを精細に再現する力触覚レンダリングによる材質感提示

Haptic Rendering for Material Texture Presentation Reproducing Stick-Slip Precisely

中原線¹⁾, 長谷川晶一¹⁾

Sen NAKAHARA and Shoichi HASEGAWA

1) 東京工業大学 工学院 情報通信系 (〒 226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259 R2-20)

概要: 我々は部分滑りや静止摩擦の時間依存性といった摩擦の性質を取り入れた力触覚レンダリング手法を提案する。この手法では、指を物体上で滑らせたときに生じる固着滑り現象を従来法よりも精細に再現することができ、VR システムにおける材質感知覚の向上が期待できる。本大会では、提案手法と力覚インタフェースの SPIDAR を用いて、いくつかの材料の上で指を滑らせたときの触覚を提示する技術展示を行う。

キーワード: 摩擦, 力触覚レンダリング, シミュレーションモデル

1. 序論

物体モデルと力覚インタフェースの状態から、物体に触れたときの感覚・知覚を提示するための力や運動の情報を作り出す計算を力触覚レンダリングと呼ぶ [6]。物体に触れて、指を滑らせようとしたときに生じる摩擦は、触覚知覚において重要な 5 つの次元のうちの 1 つに数えられている [15, 12]。したがって VR システムにおいて、より現実に近い摩擦振動を提示することで、物体の材質のリアリティの向上 [18] や操作感の向上 [10] が期待できる。記録ベースの振動刺激による材質感提示は既に提案されている [16]。しかしこの手法を力触覚レンダリングに応用しようとすると、様々な材質の物体の各々について、ユーザの様々な指の動きに応じた振動波形を予め記録しておく必要がある。その上、想定されていない指の動きには対応できない。そのため、精緻な振動波形を再現することはできない。したがって、力触覚レンダリングにおいては、様々な材質の物体に対して、かつどのような指の動かし方に対しても、現実の摩擦振動を忠実に再現できると望ましい。

現実の摩擦には、*Amontons-Coulomb* の法則で説明される静止摩擦と動摩擦のほかに、物体表面間の相対速度に比例する粘性摩擦や、流体潤滑された 2 物体の接触面で生ずる *Stribeck* 効果 [13]、接触面が部分的に滑り始める部分滑り (pre-sliding displacement) [1]、固着時間に応じて静止摩擦係数が増加する静止摩擦の時間依存性 (rising static friction) [4] などの様々な摩擦現象が存在する。このうち、部分滑りは加速度波形に影響するため、材質感知覚への影響が大きいと考えられる。更に、物体が滑り始める際には、固着 (stick) 状態と滑り (slip) 状態が交互に繰り返される固着滑り現象 (stick-slip phenomenon) が発生することがある。触覚は振動刺激、とりわけ周波数 250 Hz 附近の振動に敏感である [9]。固着滑り現象では固着から滑りへ移行す

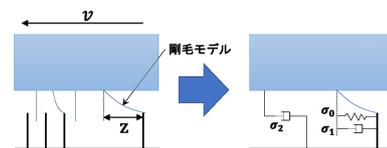


図 1: LuGre モデルの概要図

る際に物体が急加速をするため、振動が発生する。この振動の周波数は数十から数百 Hz であり [11]、まさに最も敏感な周波数帯に一致する。したがって固着滑り現象は、材質感知覚の大きな手掛かりの 1 つであると考えられる。静止摩擦の時間依存性は、この固着滑り現象の挙動に影響を与える。このような理由により、本研究では特に固着滑り現象と部分滑り、静止摩擦の時間依存性に着目する。指紋を有する指先のモデルを有限要素法で計算して部分滑りを実現した研究は存在する [7, 17] が、計算量が大きく、リアルタイムへの応用は難しい。リアルタイムな処理が要求される力触覚レンダリングにおいて、部分滑りを実現した手法は今まで存在していなかった。

そこで本研究では、前述したような様々な摩擦現象を再現できる力触覚レンダリングのための摩擦モデルを提案する。

2. LuGre モデル

LuGre モデル [2] は摩擦モデルの 1 つであり、*Coulomb* 摩擦や粘性摩擦、*Stribeck* 効果、部分滑り (pre-sliding displacement) が考慮されている。

LuGre モデルでは、物体同士の接触面を剛毛 (bristles) の集合と考える。図 1 はこのモデルの概要図である。一方の物体から生えている剛毛は、他方の物体から生えている剛毛と接触し、歪みを起こす。接触面に生えている剛毛の平均変位を z とする。それぞれの物体の剛毛同士は、バネ

係数 σ_0 , ダンパ係数 σ_1 のバネ・ダンパ系によって力を及ぼし合うと考える。また, 剛毛による力とは別に, 物体同士の相対速度 v に比例した粘性摩擦が存在すると考える。この粘性係数を σ_2 とする。このとき, 一方の物体にもたらされる摩擦力 F は, 次の式で表される。

$$F = \sigma_0 z + \sigma_1 \frac{dz}{dt} + \sigma_2 v \quad (1)$$

ここで, 剛毛の平均変位 z は, 次の微分方程式に従う。

$$\frac{dz}{dt} = v - \frac{\sigma_0 |v|}{g(v)} z \quad (2)$$

$$= v \left(1 - \frac{\sigma_0 \operatorname{sgn}(v)}{g(v)} z \right) \quad (3)$$

式 (2) の左辺は剛毛の平均変位 z の時間微分である。右辺第 1 項は, 剛毛を歪ませる要因を表している。物体同士の相対速度 v が, 剛毛を歪ませる方向に寄与する。他方, 右辺第 2 項は, 剛毛の歪みを打ち消す要因, すなわち, 剛毛同士の接触点が滑って, それ以上の歪みを引き起こさないようにする要因である。ここで $g(v)$ は, 物体の素材や, 湿潤の具合や, 温度といった様々な要因に依存する正值関数であり, $g(0)$ から v の増加に従って単調減少をする。 $g(v) > 0$ 及び $|v| \geq 0$ より, 右辺第 2 項は剛毛の平均変位 z と反対の符号を取る。このことは, 剛毛が歪めば歪むほど, 接触点が滑っている剛毛の割合が増えていくことを意味している。この剛毛の特性が, 現実の摩擦における部分滑りに相当する。

尚, *Stribeck* 効果を描写するための $g(v)$ のパラメータ化の一例としては, 次のようなものがある。

$$g(v) = F_C + (F_S - F_C) e^{-(v/v_s)^2} \quad (4)$$

v_s は *Stribeck* 速度と呼ばれるパラメータである。 *Stribeck* 速度 v_s が 0 に近ければ近いほど *Stribeck* 曲線が急峻になる。物体同士の相対速度 v が *Stribeck* 速度 v_s を持つとき, 摩擦は静止摩擦から動摩擦への過渡状態にあると言える。パラメータ F_S は静止摩擦力の大きさに対応して, パラメータ F_C は粘性摩擦を無視したときの動摩擦力の大きさに対応している。一般に静止摩擦力は動摩擦力よりも大きいため, これらのパラメータも $F_S > F_C > 0$ を満たす必要がある。

v が一定値のときの LuGre モデルの挙動を考察する。式 (3) より, v が一定値ならば, $dz/dt = 0$ すなわち z が一定値となる。このときの z の値は $z_{ss} = g(v) \operatorname{sgn}(v) / \sigma_0$ となる¹。このことと式 (1), 式 (4) より, F の値は次のようになる。

$$F_{ss} = g(v) \operatorname{sgn}(v) + \sigma_2 v \quad (5)$$

$$= \operatorname{sgn}(v) \left(F_C + (F_S - F_C) e^{-(v/v_s)^2} \right) + \sigma_2 v \quad (6)$$

粘性及び荷重が一定であるとしたとき, F_{ss} は LuGre モデルの *Stribeck* 曲線をなす。

3. 提案モデル

LuGre モデルを発展させて, 静止摩擦の時間依存性を *Stribeck* 曲線と統一的に扱えるように組み込んだ新たなモデルを提案する。LuGre モデルでは, 関数 $g(v)$ は物体同士の相対速度 v のみに依存している。この関数は物体同士の相対速度に応じた動摩擦係数の変化 (*Stribeck* 効果) を表現することはできるが, $v \approx 0$ のとき, 固着時間に応じて増加する静止摩擦係数を表現することはできない。そこで, 新たな変数として平均固着継続時間 T を定義して, 関数 $g(v)$ をこの変数 T に依存するような新たな関数 $g(T)$ として書き換えることによって, *Stribeck* 効果を表現すると同時に静止摩擦の時間依存性をも表現する。元々動摩擦は小さな固着滑り現象によって生じることが知られている [14]。したがって, このモデルは *Stribeck* 曲線を定義する LuGre モデルよりも物理現象を直接的に表現していると言える。平均固着継続時間 T は, その時点において各剛毛が固着を継続している時間の, 全ての剛毛についての平均値である。その値は, 次のように計算される。

$$T \leftarrow \min \left(T + \Delta t, \frac{z_{ss}}{v} = \frac{g(T)}{\sigma_0 |v|} \right) \quad (7)$$

ここで, Δt は力触覚レンダリングの制御周期である。平均固着継続時間の 1 ステップあたりの増分が最大となるのは, 全ての剛毛が固着を継続した場合である。このとき, 全ての剛毛の固着継続時間が等しく Δt ずつ増加するので, それらを平均した固着継続時間 T もまた Δt だけ増加する。剛毛が固着から滑りに移行するとき, 剛毛には質量が無いので直ちに吊り合いの位置に移動する。そして滑った剛毛の固着継続時間は, 直ちに 0 にリセットされる。したがって, 滑った剛毛が存在する場合は, 平均固着継続時間 T の増分が Δt よりも少なくなる。 v が一定値のときは, 各剛毛の変位は 0 から $2z_{ss}$ まで一様に分布しており, 剛毛全体のうち常に同じ割合の剛毛が滑っている。したがって, 各剛毛の固着継続時間も 0 から $2z_{ss}/|v|$ まで一様に分布しており, その平均値は $z_{ss}/|v|$ となるのである。このような変数 T の関数として, $g(T)$ を次のように定義する [4]。

$$g(T) = A + B \log(CT + 1) \quad (8)$$

ここで, A, B, C は静止摩擦の時間依存性の増え方を決める正の定数である。LuGre モデルの $g(v)$ と同様に, $g(T)$ も v が一定値のときの値を集めたものになっている。剛毛の平均変位 z は, LuGre モデルと同様に, 次の微分方程式に従って更新する。

$$\frac{dz}{dt} = v - \frac{\sigma_0 |v|}{g(T)} z \quad (9)$$

$$= v \left(1 - \frac{\sigma_0 \operatorname{sgn}(v)}{g(T)} z \right) \quad (10)$$

最後に, 摩擦力 F は次のように計算する。

$$F = F_{\perp} \left(\sigma_0 z + \sigma_1 \frac{dz}{dt} + \sigma_2 v \right) \quad (11)$$

ここで, F_{\perp} は垂直抗力である。

¹ss は steady state を意味する。

4. 評価実験

4.1 目的

提案モデルを用いた力触覚レンダリングにおいて、部分滑りや静止摩擦の時間依存性といった摩擦現象を再現できることを確認する。また、固着滑り現象が再現でき、更に現実の固着滑り現象に見られる特徴がシミュレーションにおいても見られることを確認する。

4.2 方法

力触覚レンダリングの手法として、バーチャル・カップリング [3] を用いた。力覚インタフェースのグリップ位置 (=Haptic Interface Position, HIP) が物体モデルに侵入したとき、物体モデルに侵入せずに、HIP にできるだけ近づこうとする質量 $m = 3g$ を持つツールを考える。HIP とツールはばね係数 $K = 1500 \text{ N/m}$ のばね及びダンパ係数 $c = 50 \text{ Ns/m}$ のダンパで繋がれている。ここで、空間に固定された床のモデルを用意する。HIP からばねとダンパによって伝えられる、ツールにかかる床に垂直な力を、摩擦計算に用いる垂直抗力 F_{\perp} とする。また、ツールと床の相対速度を、摩擦計算に用いる物体同士の相対速度 v とする。そしてこれらを用いて計算された摩擦力 F が、床と水平な方向に作用する。この摩擦力計算は提案モデルを用いたものであり、そのパラメータは $\sigma_0 = 4000$, $\sigma_1 = 4$, $\sigma_2 = 0.4$, $A = 1.0$, $B = 1.6$, $C = 40$ と設定した。HIP の更新周波数は 1 kHz とし、摩擦計算及びツールの位置の更新周波数は 10 kHz ($\Delta t = 100 \mu\text{s}$) とした。式 (9) の微分方程式は周期 Δt で差分化した。この条件の下で HIP を動かすシミュレーションを行い、そのときのモデルの挙動を観察した。HIP の初期位置は、床に $x_{\perp} = 1.33 \text{ mm}$ だけ侵入した位置 (すなわち垂直抗力 $F_{\perp} = Kx_{\perp} = 2 \text{ N}$ となる位置) とした。そこで HIP を 0.5 s の間静止させた後、 1.5 s の間床と平行に加速度 0.02 m/s^2 の等加速度運動をさせ、その後 1 s の間等速度運動をさせて、HIP とツールの速度と加速度、及び摩擦力を観察した。

4.3 結果と考察

シミュレーションの結果を図 2 に示した。

図 2 におけるツールの床に平行な加速度は、いくつかの極大値が立ち上がっている。これらは固着滑り現象における滑りに対応している。このそれぞれの滑りについて、滑り始めにおいて加速度が滑らかに立ち上がっていることがわかる。提案手法に組み込まれた部分滑りがこの挙動に寄与していると考えられる。

またシミュレーションにおける固着滑り現象について、固着滑り現象の固着の感覚は徐々に狭く、滑り加速度の極大値は徐々に低くなっていく。提案手法に組み込まれた静止摩擦の時間依存性がこの挙動に寄与していると考えられる。

これらの挙動は、現実にくént紙を指先で擦ったときの示指爪上加速度波形 (図 3) にも見られる特徴であり、かつ従来の力触覚レンダリング手法では再現できなかった挙動である。

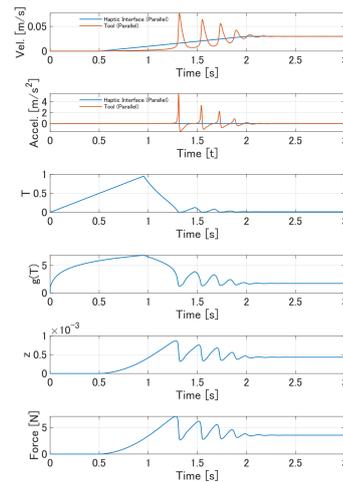


図 2: シミュレーション結果

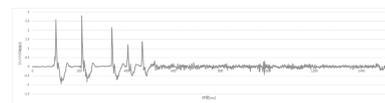


図 3: ケント紙を指先で擦ったときの示指の爪上の加速度

5. 技術展示

いくつかの材料を指先で擦った際の現実の摩擦振動波形を測定し、これを用いて各材料に対応する提案手法のパラメータを決定する。このパラメータをもとに、いくつかの材料を指先で擦った際の触覚を提示する技術展示を行う。

5.1 材料に対応するパラメータの決定方法

まず、いくつかの材料を示指の指先で擦った際の摩擦波形 (垂直抗力、剪断力並びに示指の指先及び指根元の剪断方向の加速度) を測定する。測定したデータを用いて、各材料に対応する提案手法のパラメータを決定する。進化戦略の一種である CMA-ES (共分散行列適用進化戦略) [5] を用いて各パラメータの最適化を行う。4.2 節と同様のバーチャル・カップリングを用いたシミュレーションを行う。最適化するパラメータは、HIP とツールを繋ぐばねダンパのばね係数 K とダンパ係数 c 、ツールの質量 m 、提案モデルにおける剛毛間のばねダンパのばね係数 σ_0 とダンパ係数 σ_1 、物体間の粘性摩擦係数 σ_2 、関数 $g(T)$ の係数である A, B, C の計 9 個である。測定した剪断方向の指根元加速度を HIP の床に平行な方向の加速度として、また測定した垂直抗力をツールにかかる垂直抗力として HIP を動かす。このシミュレーションの結果現れる摩擦力とツールの床に平行な方向の加速度を、前節で測定した剪断力と指先の加速度に、それぞれ対応させる。CMA-ES の評価関数は、対応する両者が近い波形を取ったときに良い評価を与えるように設計する。

5.2 材質感提示方法

参加者は、力覚インタフェースを用いて、提案手法によってレンダリングされたバーチャルな床を擦る。レンダリン

グの際に前節で決定した材料に応じたパラメータを用いることによって、参加者は数種類の材質感を体感することができる。

力覚インタフェースとしては、佐藤らによって開発された SPIDAR-G[8] を用いる。SPIDAR-G は、中心のグリップに対して 8 本の糸が取り付けられており、これらの糸がそれぞれエンコーダ付モータによって制御される並列機構型の力覚インタフェースである。任意の方向に任意の力を出力することができ、グリップの上に指先を乗せ、握ることで指先に力を伝えることができる。広い帯域の振動を提示できることから、現実の指の滑り摩擦で生じる力と振動を高精度に再現することを期待できる。

6. 結論

本研究では、部分滑りや静止摩擦の時間依存性といった摩擦の性質を組み込んだ摩擦モデル及びこのモデルを用いた力覚レンダリング手法を提案した。また、現実の固着滑り現象に見られる特徴が提案手法を用いたシミュレーションにおいても見られることを、評価実験によって確認した。更に、提案手法を用いて、いくつかの材料の材質感を力覚レンダリングにおいて再現することを試みた。

今後は、力覚インタラクションにおいて、提案手法による力覚レンダリングがユーザの触覚に与える影響を明らかにするために、主観評価を行う必要がある。更なる展望としては、提案手法を物理エンジンへ組み込むことによって、物体の把持操作などへの応用が期待できる。

謝辞 研究用のコードや実験装置、図表を提供してくださった石田亮太氏に深く感謝をいたします。

参考文献

- [1] B. Armstrong-Helouvy. Stick slip and control in low-speed motion. *IEEE Trans. on Automatic Control*, Vol. 38, No. 10, pp. 1483–1496, 1993.
- [2] C. Canudas de Wit, H. Olsson, K.J. Astrom, and P. Lischinsky. A new model for control of systems with friction. *IEEE Trans. on Automatic Control*, Vol. 40, No. 3, pp. 419–425, 1995.
- [3] J.E. Colgate, M.C. Stanley, and J.M. Brown. Issues in the haptic display of tool use. In *Proc. 1995 IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems. Human Robot Interaction and Cooperative Robots*, Vol. 3, pp. 140–145 vol.3, 1995.
- [4] J.H. Dieterich. Modeling of rock friction: 1. experimental results and constitutive equations. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 84, No. B5, pp. 2161–2168, 1979.
- [5] N. Hansen and A. Ostermeier. Adapting arbitrary normal mutation distributions in evolution strategies: the covariance matrix adaptation. In *Proc. of IEEE Intl. Conf. on Evolutionary Computation*, pp. 312–317, 1996.
- [6] S. Hasegawa. 力覚レンダリング—提示力計算とそのためのモデル. *システム／制御／情報*, Vol. 64, No. 4, pp. 140–144, 2020.
- [7] Y. Igaki, K. Tagawa, and H.T. Tanaka. 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*, pp. 93–94, 2017.
- [8] M. Ishii and M. Sato. A 3d spatial interface device using tensed strings. *Presence*, Vol. 3, pp. 81–86, 01 1994.
- [9] E.R. Kandel, J.H. Schwartz, and T.M. Jessel. *Principles of Neural Science ed. 4*. McGraw-Hill, 2000.
- [10] D.A. Kontarinis and R.D. Howe. Tactile Display of Vibratory Information in Teleoperation and Virtual Environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 4, No. 4, pp. 387–402, 1995.
- [11] M. Konyo, H. Yamada, S. Okamoto, and S. Tadokoro. Alternative display of friction represented by tactile stimulation without tangential force. In M. Ferre, editor, *Haptics: Perception, Devices and Scenarios*, pp. 619–629, Berlin, Heidelberg, 2008. Springer Berlin Heidelberg.
- [12] W. Li, M.L. Zhan, Q.Y. Yu, B.Y. Zhang, and Z.R. Zhou. Quantitative assessment of friction perception for fingertip touching with different roughness surface. *Biosurface and Biotribology*, Vol. 1, No. 4, pp. 278 – 286, 2015.
- [13] J.A.C. Martins, J.T. Oden, and F.M.F. Simões. A study of static and kinetic friction. *Intl. J. of Engineering Science*, Vol. 28, No. 1, pp. 29 – 92, 1990.
- [14] H. Matsukawa. 摩擦の物理. *表面科学*, Vol. 24, No. 6, pp. 328–333, 2003.
- [15] S. Okamoto, H. Nagano, and Y. Yamada. Psychophysical dimensions of tactile perception of textures. *IEEE Trans. on Haptics*, Vol. 6, No. 1, pp. 81–93, 2013.
- [16] J.M. Romano and K.J. Kuchenbecker. Creating realistic virtual textures from contact acceleration data. *IEEE Trans. on Haptics*, Vol. 5, No. 2, pp. 109–119, 2012.
- [17] K. Tagawa, Y. Igaki, and H.T. Tanaka. 指紋を有する指先の Stick-Slip シミュレーション. *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 24, No. 4A-06, 2019.
- [18] P. Wellman and R.D. Howe. Towards realistic vibrotactile display in virtual environments. *ASME DSC div. (Pub.) DSC*, Vol. 57-2, pp. 713–718, 1995.