



様々な摩擦現象を再現する 力触覚レンダリングのための摩擦モデルの提案

Proposal of a Friction Model for Haptic Rendering
to Reproduce Various Friction Phenomena

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 情報通信コース 長谷川晶一研究室 (〒 226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259 R2-624, info@haselab.net)

概要: 従来の力触覚レンダリング手法で提示される摩擦は、静止摩擦と動摩擦からなる *Coulomb* 摩擦であった。しかし、現実にはそれ以外にも様々な摩擦現象が存在し、これらを再現することができれば VR システムにおける触覚提示の向上が期待できる。本研究では、*Stribeck* 効果や部分滑りなどの摩擦現象を再現する LuGre モデルを拡張して、時変静止摩擦をも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。

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 [4]。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 [12, 10]。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 [16] や操作感の向上 [8] 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 [13]。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、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、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ような力触覚レンダリング手法が求められている。

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 [11]、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変化 (時変静止摩擦, rising static friction) [3] 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

返される stick-slip 現象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 付近の振動に敏感である [7]。stick-slip 現象では固着から滑りへ移行す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 [9]、まさに最も敏感な周波数帯に一致する。したがって stick-slip 現象は、材質感知の大きな手掛かりの 1 つであると考えられる。時変静止摩擦は、この stick-slip 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 stick-slip 現象と部分滑り、時変静止摩擦に着目する。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 [5, 15] 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

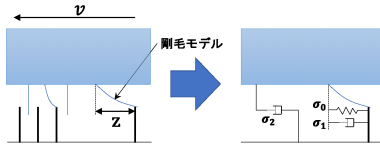


図 1: LuGre モデルの概要図

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。

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

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

¹ss は steady state を意味する。

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、時変静止摩擦を *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、函数 $g(v)$ は物体同士の相対速度 v のみに依存している。この函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、函数 $g(v)$ をこの変数 T に依存するような新たな函数 $g(T)$ 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時変静止摩擦をも表現する。元々動摩擦は小さな stick-slip 現象によって生じることが知られている [17]。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。このような変数 T の函数として、 $g(T)$ を次のように定義する [3]。

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

ここで、 A, B, C は時変静止摩擦の増え方を決める正の定数である。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。

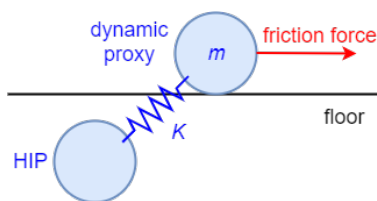


図 2: 評価実験における実装の概要図

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、部分滑りや時変静止摩擦などの摩擦現象が再現できていることを確認する。また、stick-slip 現象が発生することを確認する。

4.2 方法

図 2 は評価実験における実装の概要図である。力触覚レンダリングの手法として、Proxy 法 [14] からの派生である Ikeda ら [6] の手法を用いた。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 $m = 10\text{ g}$ を持つ力覚ポインタ (proxy) を考える。HIP と proxy はばね係数 $K = 2000\text{ N/m}$ のばねで繋がれている。ここで、空間に固定された床のモデルを用意する。proxy には、HIP にかかる proxy と接続されたばねによる床に垂直な力を垂直抗力 F_{\perp} として、proxy と床の相対速度を物体同士の相対速度 v としたときの摩擦力 F が、床と水平な方向に作用する。この摩擦力は提案モデルを用いて計算したものであり、そのパラメータは $\sigma_0 = 2000$, $\sigma_1 = 40$, $\sigma_2 = 0.4$, $A = 0.1$, $B = 2$, $C = 10$ と設定した。HIP の更新周波数は 1 kHz とし、摩擦計算及び proxy の位置の更新周波数は 100 kHz ($\Delta t = 10\text{ }\mu\text{s}$) 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 を動かし、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 $x_{\perp} = 3\text{ mm}$ だけ侵入した位置 (すなわち垂直抗力 $F_{\perp} = Kx_{\perp} = 6\text{ N}$ となる位置) とした。そこから初期位相 0 rad , 振幅 $0.5/\pi\text{ [m]}$, 角速度 $0.5\pi\text{ [rad/s]}$ で正弦振動させて、挙動を観察した。

4.3 結果

HIP に正弦振動をさせた結果を図 3 に示した。

4.4 考察

速度や加速度の波形を観察すると、HIP の速度が 0 となったから再び動き出す部分で、proxy に stick-slip 振動が発生していることが見て取れる。最初は剛毛が完全に固着しており、平均固着時間 T が線型に増加していく。したがって、摩擦係数にあたる函数 $g(T)$ の値も対数的に増加する。ここに、時変静止摩擦の特性が表れている。平均固着時間 T は、その後減少に転じる。これは、固着から解放され、新たな吊り合いの位置まで滑った剛毛が現れだしたことを意味している。それに伴い、剛毛の平均変位 z や、摩擦力 F も減少し、proxy が滑り出し、stick-slip 振動が発生する。その後、振動は減衰し、proxy は HIP の付近まで到達する。この一

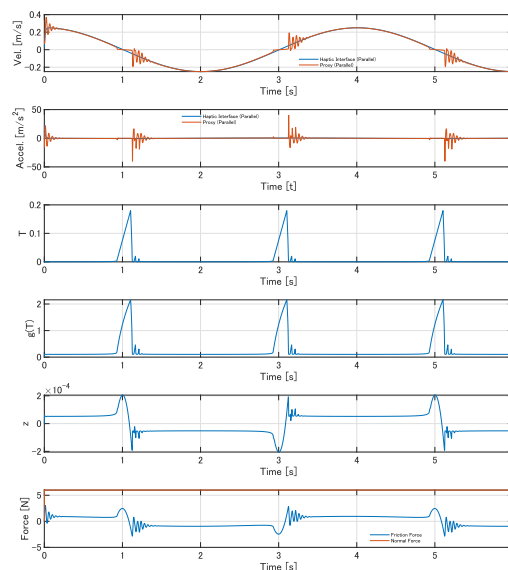


図 3: 実験結果

連の流れが繰り返されている。stick-slip 振動が発生している部分では HIP が加速しているため、平均固着継続時間 T のピークは徐々に小さくなっている。摩擦係数にあたる函数 $g(T)$ も度々増加するものの、そのピークは徐々に小さくなっている。そして、このようにして生じた proxy の加速度波形は、現実の指で発生する stick-slip 振動の加速度波形に類似した特徴を持っている。

5. 結論

本研究では、力触覚レンダリングに用いるための、部分滑りや時変静止摩擦を含む摩擦モデルを提案した。また、このモデルを用いた評価実験により stick-slip 現象が発生することを確認した。

今後の展望としては、様々な材質の物体をこすった際の振動波形をもとに、それぞれの材質に応じたパラメータを同定して、提案モデルを用いた材質感の再現をすることが挙げられる。また、ハプティックインタラクションにおいて、提案モデルで提示した部分滑りや時変摩擦係数がユーザの触覚に与える影響について、主観評価をする必要がある。更に、提案手法を物理エンジンへ組み込むことができれば、物体の把持操作などへの応用が期待できる。

謝辞 研究用のコードや図表を提供して下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 Transactions 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 Transactions on Automatic Control*, Vol. 40, No. 3, pp. 419–425, 1995.
- [3] James H Dieterich. Modeling of rock friction: 1. experimental results and constitutive equations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 84, No. B5, pp. 2161–2168, 1979.
- [4] Shoichi Hasegawa. 力触覚レンダリング—提示力計算とためのモデル. システム／制御／情報, Vol. 64, No. 4, pp. 140–144, 2020.
- [5] Yuuki Igaki, Kazuyoshi Tagawa, and Hiromi 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.
- [6] Yuto Ikeda, Masahiko Inami, and Shoichi Hasegawa. 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論文誌, Vol. 13, No. 1, pp. 75–84, 2008.
- [7] E. R. Kandel, J. H. Schwartz, and T. M. Jessel. *Principles of Neural Science ed. 4*. McGraw-Hill, 2000.
- [8] Dimitrios A. Kontarinis and Robert 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.
- [9] Masashi Konyo, Hiroshi Yamada, Shogo Okamoto, and Satoshi Tadokoro. Alternative display of friction represented by tactile stimulation without tangential force. In Manuel Ferre, editor, *Haptics: Perception, Devices and Scenarios*, pp. 619–629, Berlin, Heidelberg, 2008. Springer Berlin Heidelberg.
- [10] 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.
- [11] J.A.C. Martins, J.T. Oden, and F.M.F. Simões. A study of static and kinetic friction. *International Journal of Engineering Science*, Vol. 28, No. 1, pp. 29 – 92, 1990.
- [12] S. Okamoto, H. Nagano, and Y. Yamada. Psychophysical dimensions of tactile perception of textures. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 6, No. 1, pp. 81–93, 2013.
- [13] J. M. Romano and K. J. Kuchenbecker. Creating realistic virtual textures from contact acceleration data. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 5, No. 2, pp. 109–119, 2012.
- [14] Diego C. Ruspini, Krasimir Kolarov, and Oussama Khatib. The haptic display of complex graphical environments. In *Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, SIGGRAPH '97, p. 345–352, USA, 1997. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- [15] Kazuyoshi Tagawa, Yuuki Igaki, and Hiromi 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.
- [16] Parris Wellman and Robert D. Howe. Towards realistic vibrotactile display in virtual environments. *American Society of Mechanical Engineers, Dynamic Systems and Control Division (Publication) DSC*, Vol. 57-2, pp. 713–718, 1995.
- [17] 松川宏. 摩擦の物理. 表面科学, Vol. 24, No. 6, pp. 328–333, 2003.