

指で皮膚を擦る時に皮膚の柔らかさが摩擦係数に与える影響

Effects of the skin softness on coefficient of friction while a finger slides on the skin

○学 井上 公貴 (名古屋大) 正 岡本 正吾 (名古屋大)
正 秋山 靖博 (名古屋大) 正 山田 陽滋 (名古屋大)

Koki INOUE, Shogo OKAMOTO, Yasuhiro AKIYAMA and Yoji YAMADA, Nagoya University

Human touches his/her skin using fingers on a daily basis. It is important to understand the tribological phenomena while fingers slide over soft surfaces such as skin. We investigate the coefficients of friction when a bare finger slides over artificial skins of different softness levels whereas most of the earlier studies employed a rigid friction probe sliding over the skin. We found that the coefficient of friction is constant irrespective to the finger's normal force when the artificial skins are harder than the finger pad. In contrast, the coefficient of friction decreases as the the finger's normal force increases for the artificial skins softer than the finger pad. Furthermore, the coefficient of friction itself and its speed dependence component become greater for the softer artificial skin.

Key Words: Friction, Finger, Softness, Normal Force, Contact Area

1 緒言

人は日常的に肌を指で触る。肌のような柔らかい表面を擦る際の摩擦現象の理解はスキンケア製品などの開発に重要である。これまでに皮膚表面を擦った場合の摩擦係数と法線力、触察速度との関係についてさまざまな研究がなされてきた。例えば、Naylorらは、脛骨前面部の皮膚にポリエチレン端子を滑らす実験を行い、その際の摩擦を測定した。その結果、法線力が2 Nから7 Nの範囲で、皮膚表面と端子間の摩擦係数はおよそ0.5で一定であった [1]。一方で、El-Shimiはステンレス鋼と人の腕の皮膚との間の摩擦を測定し、法線力が0.25 Nから1.8 Nに上昇する際に摩擦係数は減少するという結果を示した [2]。Weiらは、人の前腕部の皮膚上でポリプロピレン球を滑らせ、その間の摩擦を測定した。その結果、法線力が0.1 Nから0.9 Nに上昇するにつれ摩擦係数は上昇し、滑り速度が0.5 mm/sから4 mm/sに上昇するにつれ摩擦係数は上昇するという結果を示した [3]。これらのように、皮膚表面における摩擦については多く研究がなされているが、摩擦の物理的特徴に関して報告は一貫していない。また、これらの研究は指ではなく剛体プローブを用いて擦った際の摩擦係数の物理的な特徴に焦点が当てられており、指で皮膚のような柔らかい素材を触察した際の摩擦について調査した研究はほとんどない。さらに、指で柔らかい表面を擦る場合の摩擦の物理的な特徴については、従来の摩擦モデルで完全に説明できるものではない。

われわれは皮膚の柔らかさと表面形状を模した人工皮膚素材の表面を指で触察し、摩擦を計測した。触察時の摩擦係数と法線力、触察速度との関係が素材の柔らかさに依存してどのように変化するかを調査した。指での押し込み時特有の現象である接触面積の法線力依存性を考慮した摩擦係数モデルで観察された事象を説明した。本研究は、指で皮膚のような柔らかい表面を擦る際の摩擦の物理的な特徴を理解する手掛かりとなる。

2 法線力依存性を考慮した摩擦係数モデル

2.1 Hertzの接触理論

指での触察時の接触面積について考える際、接触する二つの弾性体の変形や接触面、反力の関係を定式化したものとして知られるHertzの接触理論が一般に用いられる。この理論は二つの弾性体の接触時に生じる歪みが小さいなどのさまざまな仮定を基にしているため、人の指には厳密に当てはまらないが、指腹の微小変形について考える際や、現象の大局的理解のためによく用いら

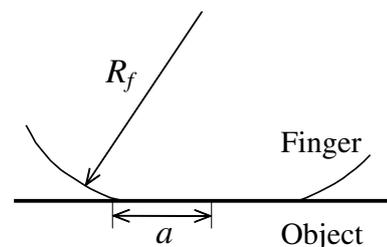


Fig.1: Contact plane between finger and flat surface by Hertz's contact theory

れる。

図1は、指腹を模した球体が弾性平面に接触するときの様子を示す。指腹を模した球体の半径は R_f である。球が弾性平面を荷重 f_n で押し込んだ時、二つの弾性体の接触面は半径 a の円である。この半径 a は、

$$a = \left(\frac{3Rf_n}{4E^*} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

で表される。ここで、 E^* は二つの弾性体の縦弾性係数とポアソン比によって与えられる有効弾性係数である。また、 R は有効半径であり、二つの弾性球の半径によって決定される。指が押し込む弾性体を平面とすると、有効半径 R は R_f と等しい。以上より、二つの弾性体の円形接触面積 A は、

$$\begin{aligned} A &= \pi a^2 \\ &= \pi \left(\frac{3R}{4E^*} \right)^{\frac{2}{3}} \times f_n^{\frac{2}{3}} \end{aligned} \quad (2)$$

で表される。

2.2 Hertzの接触理論を基にした従来の摩擦係数モデル

凝着摩擦は、接触面積 A の凝着が、界面せん断強度 τ で破壊されるという考えから、摩擦力 f_s は、

$$f_s = \tau A \quad (3)$$

と表される。これより、摩擦係数 μ は、

$$\mu = \frac{\tau A}{f_n}$$

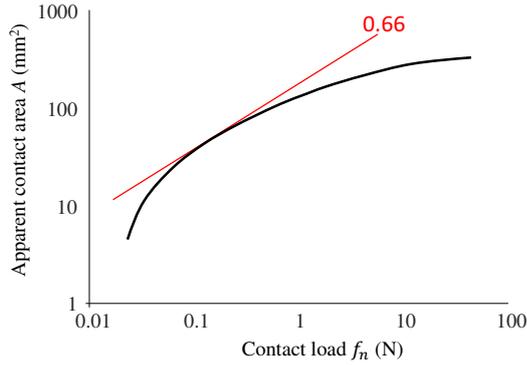


Fig.2: Relationship between contact load and apparent contact area. Adapted from Kuilenburg [4].

$$= \tau\pi \left(\frac{3R}{4E^*} \right)^{\frac{2}{3}} \times f_n^{\frac{2}{3}-1} \quad (4)$$

$$\propto f_n^{-\frac{1}{3}} \quad (5)$$

のように法線力 f_n の $-\frac{1}{3}$ 乗に比例すると考えられている。そのため、従来の摩擦係数モデルは、

$$\mu = \alpha \times f_n^\beta \quad (6)$$

のように、法線力に対する指数部分は定数項で考えられてきた。ここで、 α 、 β は定数である。

2.3 接触面積の法線力依存性

図 2 に、Kuilenburg によりまとめられた、指を剛体平面に押し付けた際の法線力と接触面積の関係を示した両対数グラフ [4] を簡略化したものを示す。Hertz の接触理論が指での押し込み時にも成り立つとすると、接触面積 A は、法線力 f_n の $\frac{2}{3}$ 乗に比例する。つまり、図 2 において法線力と接触面積のグラフの傾きは 0.66 となる。しかし、法線力が小さい場合は傾きは 0.66 より大きく、法線力が 1 N 程度より大きくなると傾きは 0.66 より小さくなる。つまり、指で擦る際の摩擦においては、摩擦係数を表す式での、法線力に対する指数部分は一定ではなく、法線力によって変化し得る。このような非線形性は指での押し込み特有の現象であり、剛体プローブによる摩擦試験では議論されてこなかった点である。

2.4 法線力依存性を考慮した摩擦係数モデル

指での押し込みでは、接触面積を表す式中の法線力に対する指数部分が法線力により変化するという点を考慮し、摩擦係数モデルを

$$\mu = a \times f_n^{b \times f_n + c} + d \times v \quad (7)$$

の形で新たに提案する。式 (7) では、法線力に対する指数部分が法線力の関数で構成される。この指数部分により、指での押し込み時特有の現象が表現される。

3 触察時に生じる二分力と触察速度の計測

3.1 計測装置

触察時に指と素材間に生じる摩擦係数、触察速度の測定には、過去に著者らの研究グループで作成された二分力センサを用いた [5]。装置の概要を図 3 に示す。装置下部に配置された 2 つの一軸フォースセンサ (9313AA2, Kistler, Switzerland) により、触察時の法線力を計測し、装置上部の 2 つの金属部品に固定された一軸高感度力センサ (9217A, Kistler, Switzerland) により接線力を計測した。計測した接線力と法線力の比として、摩擦係数を算出した。触察時の指の運動の計測には、ワイヤー式エンコーダ

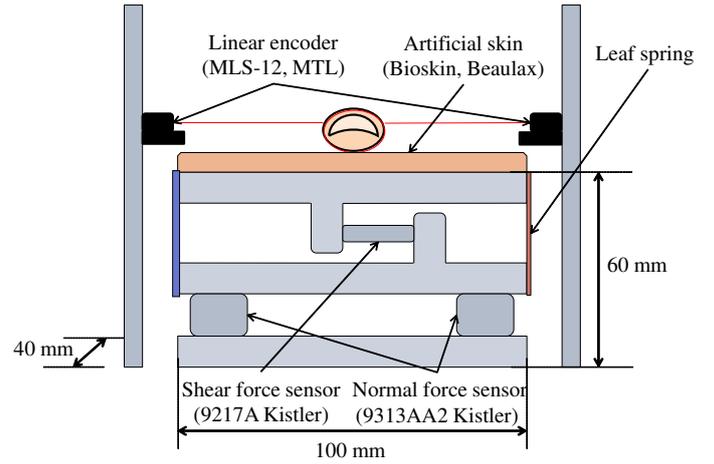


Fig.3: Measurement setup

Table 1: Softness of artificial skin models and finger. Rubber hardness values conforming to ISO 7619

Softness lv.	Hardness
1	E 19.1
2	E 18.0
3	E 16.9
4	E 11.0
5	E 9.6
6	E 7.8
7	E 3.2
Finger	E 7.9±0.4

(MTL-12, MTL Co., Japan) を用いた。エンコーダに取り付けられた紐を指に巻き付けることで、素材触察中に指と紐が同時に動くことにより、エンコーダは指の運動を計測した。指の運動計測の分解能は、0.01 mm 程度である。二分力と指の運動の計測は、共にサンプリング周波数は 2 kHz とした。

3.2 実験に用いた人工皮膚素材

われわれは、皮膚の代替として、最も硬い Softness level 1 から、最も柔らかい Softness level 7 までの 7 段階の柔らかさを持つ人工皮膚モデル (Bioskin, Beaulax ltd., Japan) を用いた。人工皮膚の表面は熱可塑性ポリウレタン薄膜でカバーされており、表面の素材と形状は統一されている。そのため、この素材を用いることにより、柔らかさの違いが摩擦にもたらす影響を調査することができる。人工皮膚の厚みは 5 mm であった。

3.3 実験課題

参加者は、二分力センサの上部に固定された素材の表面を 10 秒間擦った。試行はそれぞれの素材につき 3 回ずつとした。1 回の試行ごとに、参加者の指先と素材表面を拭き、余分な水分を除いて条件を統一した。参加者は成人男性 9 名であった。

3.4 人工皮膚と参加者の指の柔らかさ

柔らかさの指標として、人工皮膚と参加者の指腹の硬度を測定した。測定には、ISO 7619 に準拠しているタイプ E 型のゴム硬度計 (GS-721N, Teclock, Japan) を用いた。人工皮膚もしくは指を硬い平面上に置き、デュロメータの指針を静的に接触させた。人工皮膚と指腹にデュロメータの自重 (200 g) を負荷し、負荷直後のデュロメータの値を読み取った。この測定を各素材、指に対し 5 回ずつ行い、その中央値を採用した。結果を表 1 に示す。指腹の値については、参加者間の平均と標準誤差を示す。

3.5 データ処理

指で柔らかい表面を触察している最中の動摩擦現象を分析するため、指が明白に皮膚モデル上を滑っているときのデータを解析に用いた。具体的には、計測した法線力 f_n 、接線力 f_s がともに 0.05 N 以上であり、触察速度 v が 20 mm/s 以上の観測点のみを用いた。

4 柔らかさと摩擦の関係の解析結果

算出された摩擦係数 μ と、法線力 f_n 、触察速度 v の関係を、各試行ごとに法線力依存性を考慮した摩擦係数モデル式 (7) の形に近似した。決定係数を基に、曲線近似の成否を判断し、 R^2 が 0.35 より小さい試行は、以降の解析から除外した。図 4(a)–図 4(d) に、 a から d の各係数の値を示す。縦軸はそれぞれの係数の値、横軸は素材の柔らかさを示す。棒グラフは各係数の平均値、図中の誤差表記は参加者間の標準誤差である。棒グラフのオレンジ色は統計的に有意な正、青色は統計的に有意な負を示す。

4.1 a (摩擦係数の絶対的な大きさ) の解析結果

a は法線力が変化した際に生じる摩擦係数の変化、つまり摩擦係数の大きさを示す。図 4(a) より、 a はすべての柔らかさの素材について有意に正の値を示し、素材が柔らかくなるにつれ値が増加した。このことから、素材が柔らかくなり、縦弾性係数が小さくなるにつれ摩擦係数が大きくなるということが示され、摩擦係数は縦弾性係数の負のべき乗に比例するとする式 (4) と附合する。

4.2 d (摩擦係数の速度依存性) の解析結果

d は触察速度が変化した際に生じる摩擦係数の変化の大きさ、つまり摩擦係数の速度依存性を示す。図 4(d) より、 d は柔らかさレベル 6 以外のすべての素材について有意に正の値を示した。このことから、触察速度が速くなるにつれ、摩擦係数が増加することが示された。また、素材が指より硬いレベル 1 から 4 については、 d は比較的小さい値を示し、指と同等かそれより柔らかくなるレベル 5、7 については大きな値を示した。このことから、素材が柔らかいと摩擦係数の速度依存性が大きい。これは、素材が柔らかくなると素材の変形が大きくなり、ヒステリシス損失が大きくなることから生じる現象であると理解できる。

4.3 b と c (法線力の指数部分) の解析結果

b と c は摩擦係数の法線力依存性を考慮するために設定した係数であるため、同時に考える。図 4(b) と図 4(c) より、素材が指より硬いレベル 1 から 4 については、 b 、 c のどちらもほぼ 0 という結果であった。指より硬い素材の場合、摩擦係数に法線力依存性がないことが示された。素材が指より柔らかい場合については、 b が負、 c が正という結果となった。これより、法線力が増加すると、法線力に対する指数部分が減少していき、摩擦係数が小さくなっていくということが示された。すなわち、素材の柔らかさにより、摩擦係数の法線力依存性が変化するということが示された。特に素材が指と同等かそれよりも柔らかい場合、指での押し込み特有の現象である接触面積と法線力の関係が考慮されなければならないことを示唆する。

5 結言

本研究は、7段階の柔らかさを有する人工皮膚を指で擦る際に生じる摩擦係数について、法線力、触察速度との関係を調査した。指と皮膚のような柔らかい表面との間における摩擦の物理的な特徴を明らかにするため、摩擦係数の法線力依存性に着目した新しい摩擦係数モデルを提案した。その結果、素材の柔らかさによって摩擦係数の法線力依存性に変化がみられ、素材が指よりも硬い場合については摩擦係数に法線力依存性がなく、素材が指と同等かそれよりも柔らかい場合には法線力が大きくなるにつれ、摩擦係数が減少することが明らかになった。

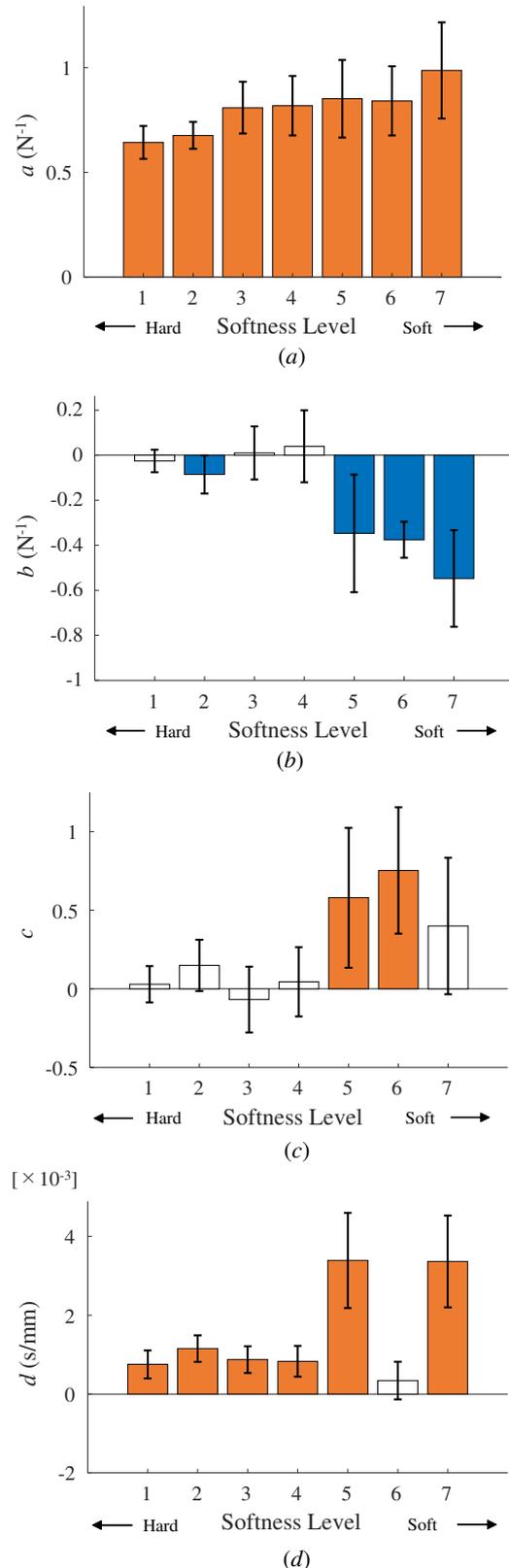


Fig.4: Averages and standard errors of a , b , c and d for each softness level of artificial skin model. Error bars indicate standard errors. Orange bars are significantly positive values and blue bars are significantly negative values whereas white bars are not statistically different from zero.

Acknowledgments

This study was in part supported by MEXT Kakenhi (15H05923, 17H04697).

参考文献

- [1] P. F. D. Naylor, "The skin surface and friction," *British Journal Dermatology*, 67, pp. 239–246, 1955.
- [2] A. F. El-Shimi, "In vivo skin friction measurements," *Journal Society Cosmetic Chemist*, 28, pp. 37–51, 1977.
- [3] W. Tang, S. rong Ge, H. Xhu, X. chuan Cao, and N. Li, "The influence of normal load and sliding speed on frictional properties of skin," *Journal of Bionic Engineering*, 5, pp. 33–38, 2008.
- [4] J. van Kuilenburg, M. Masen, and E. van Der Heide, "A review of fingerpad contact mechanics and friction and how this affects tactile perception," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J Journal of Engineering Tribology 1994-1996, vols 208-210 229(3)5*, pp. 243–258, 2015.
- [5] H. Hasegawa, S. Okamoto, E. Hatem, and Y. Yamada, "Stochastic relationships between the normal and shear interaction forces during tactile exploration of textures," *Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, pp. 3029–3034, 2018.