

指と肌のふれあい: 柔らかさが摩擦に与える影響

Contacts between the finger and skin: Effect of skin hardness on friction

○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

Understanding the tribological phenomena between fingers and soft surfaces such as skin is important for the product's design. In this study, we investigated the coefficients of friction when a bare finger slides over artificial skin with seven levels of hardness under dry and lubricated surface conditions. Under dry conditions, the coefficient of friction depended on the normal force only for artificial skins that were softer than the finger, whereas it was constant for harder artificial skins. When the surface of artificial skin was lubricated with mica, it depended on the normal force only when artificial skins were softer than a finger, as with under dry conditions. When the surface of artificial skin was lubricated with TiO_2 , it depended on the normal force even for harder skins.

Key Words: Skin friction, Finger, Hardness, Normal force

1 緒言

人は日常的に指で肌を擦る。肌のような柔らかい表面を擦る際の摩擦現象の理解は化粧品などの開発に重要である。本研究では、指で人工皮膚の表面を擦る際の摩擦係数と法線力、触察速度の関係について注目した。

先行研究では、皮膚と剛体プローブ間の摩擦について議論されている。多くの研究では、摩擦係数は一般に法線力が増加するにつれ減少し、およそ法線力の $-1/3$ 乗に比例するとされている [1, 2, 3, 4, 5, 6]。しかしながら、法線力が増加するにつれ摩擦係数は増加するといった報告 [7] や、法線力によらず摩擦係数は一定であり、Amonton の法則が成立するという報告 [8, 9] など、用いるプローブや潤滑 [10, 11, 12] といった条件により摩擦係数の法線力依存性は変化する。また、これらの多くでは皮膚と剛体プローブ間、もしくは指と剛体平面間の摩擦が調査され、指で皮膚のような柔らかい表面を擦った際の摩擦について調査した研究はほとんどない。

われわれは皮膚の柔らかさと表面形状を模した七段階の柔らかさを持つ人工皮膚素材の表面を指で擦り、その際の摩擦を計測した。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。さらに乾燥(無潤滑)、マイカ粉体による潤滑、酸化チタン粉体による潤滑という三つの表面条件について調査した。指での押し込み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測された事象を説明した。

2 摩擦モデル

2.1 Hertz の接触理論を基にした従来の摩擦係数モデル

凝着摩擦は人肌と平面との間の摩擦において支配的とされている [6, 13, 14]。この摩擦は、真実接触面積 A_r 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、

$$f_s = \tau A_r \quad (1)$$

と表される。Hertz の接触理論より、指腹を模した半径 R_f の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 r の円となる。この時、見かけの接触面積 A は、

$$\begin{aligned} A &= \pi r^2 \\ &= \pi \left(\frac{3R_f}{4E^*} \right)^{2/3} f_n^{2/3}, \end{aligned} \quad (2)$$

のように、法線力 f_n の $2/3$ 乗に比例する。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。見かけの接触面積と真実接触面積が一致すると仮定

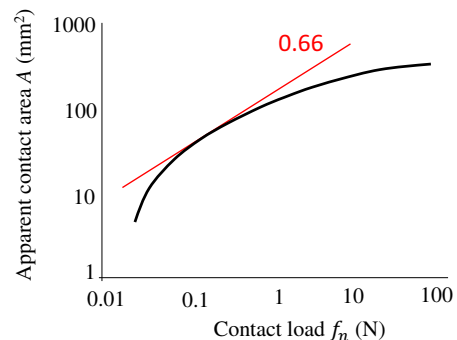


Fig.1 Relationship between contact load and apparent contact area of the finger pad, adapted from Kuilenburg [15]

すると、式 (1)、式 (2) より、凝着摩擦による摩擦係数 μ は、

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{\tau A_r}{f_n} \\ &= \tau \pi \left(\frac{3R_f}{4E^*} \right)^{2/3} f_n^{2/3-1} \\ &\propto f_n^{-1/3}. \end{aligned} \quad (3)$$

のように、法線力の $-1/3$ 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、

$$\mu = \alpha f_n^\beta \quad (5)$$

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。

2.2 接触面積の法線力依存性を考慮した摩擦係数モデル

図 1 に、Kuilenburg 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見かけの接触面積の関係を示した両対数グラフを示す。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、見かけの接触面積 A は、法線力 f_n の $2/3$ 乗に比例する。つまり図 1 の傾きはおよそ 0.66 となる。しかし、法線力が 1 N 程度より小さい場合は傾きは 0.66 より大きく、法線力が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、式 (5) の指数部分 β は定数ではなく、法線力により変化し得る。このような非線形性は指での押し込み特有の現

Table 1 Hardness of artificial skins and human fingers.
Shore AO hardness values conforming to ISO
7619-1. Higher values indicate harder materials.

Hardness lv.	1	2	3	4
Hardness	AO 19.1	AO 18.0	AO 16.9	AO 11.0
Hardness lv.	5	6	7	Finger
Hardness	AO 9.6	AO 7.8	AO 3.2	AO 9.0±2.1

象であり、剛体プローブを用いる従来の研究では議論されてこなかった。

以上のことを踏まえ、指で平面を擦る際の摩擦において、新たに摩擦係数モデルを、

$$\mu = af_n^{bf_n+c} + dv \quad (6)$$

の形で提案する。ここで、 v は触察速度を示す。式 (6) では、法線力に対する指数部分を b と c で表される法線力の関数とすることで、図 1 で表される指での押し込み特有の見かけの接触面積と法線力との傾きの変化を表している。 a は摩擦係数の大きさを示し、式 (3) で表されるように素材の柔らかさに依存する。さらに、 d は速度依存の項である。多くの場合、摩擦係数は触察速度と共に単調に増加もしくは減少する [4, 5, 7, 13, 16, 17]、もしくはある速度でピークを持つ [16]。本研究では、摩擦係数は速度と共に単調に変化した。そのため、速度依存の項を一次関数とした。後の実験条件では触察速度の影響は無視できないため、この項は必要である。

3 実験

3.1 計測装置

触察時に指と人工皮膚素材間に生じる摩擦係数と触察速度は著者らの研究グループで作成された二分力センサで計測した [18, 19]。法線力は 2 つの一軸力センサ (9313AA2, Kistler, Switzerland)、接線力は一軸高感度力センサ (9217A, Kistler, Switzerland) を用いて計測した。計測された接線力と法線力の比として、摩擦係数を算出した。触察中の指の運動はワイヤー式エンコーダ (MTL-12, MTL Co., Japan) を用いた。二分力と指の運動の計測周期は 2 kHz とした。

3.2 実験に用いた人工皮膚

実験には 7 段階の柔らかさを持つ市販の人工皮膚モデル (Bioskin, Beaulax ltd., Japan) を用いた。厚さは 5 mm であり、表面は熱可塑性ポリウレタン薄膜でカバーされ、表面の粗さは人肌を模したものであった (表面粗さ, R_a : $7.6 \pm 1.9 \mu\text{m}$ [20])。

人工皮膚モデルと被験者の指についてそれぞれ、軟質ゴムの硬度を示す指標であるショア AO 硬度を計測した。計測には ISO7619-1 に準拠する市販のデュロメータ (GS-721N, Teclock, Japan) を用いた。人工皮膚と指腹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。200 gf の負荷を与え、その直後のデュロメータの指示値を読み取った。この計測をそれぞれの素材について 5 回ずつ行い、その中央値を採用した。結果を表 1 に示す。指腹の値は、全参加者間の平均と標準誤差を示す。

実験は乾燥 (無潤滑) と、2 種類の粉体による潤滑という 3 条件で行われた。潤滑に用いる粉体として一般に化粧品に用いられるマイカ (平均粒径: $2 \mu\text{m}$) と、酸化チタン (TiO_2 , 平均粒径: $0.25 \mu\text{m}$) を用いた。マイカは摩擦を低減させ、酸化チタンは肌に凝着する。

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、材質を調査するように人差し指を使って 10 秒間擦った。指の速度や力については指示しなかった。試行回数は、乾燥条件ではそれぞれの素材につき 3 回ずつ、潤滑条件では 10 回ずつとした。潤滑条件では乾燥条件より被験者が少なかった。1 回の試行ごとに参加者の指先と素材表面を乾燥した布で拭いた。実験の様子を図 2 に示す。参加者は乾燥条件では成人男性 11 名、潤滑条件では成人男性 8 名であった。

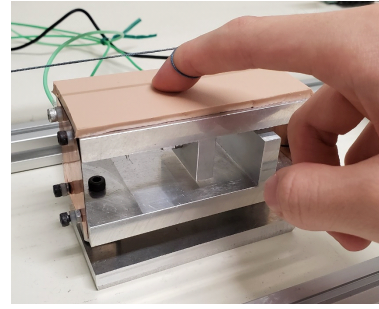


Fig.2 Experimental setup

3.4 データ処理

動摩擦現象を分析するため、指が明確に人工皮膚を擦っている際のデータのみを解析対象とした。具体的には、法線力 f_n 、接線力 f_s とともに 0.05 N 以上であり、触察速度 v が 20 mm/s 以上である瞬間データのみを解析した。

各試行について、 μ , f_n , v の関係を式 (6) の形で近似した。近似の成否は決定係数 R^2 に基づいて判断した。 R^2 が 0.35 より小さい試行は、以降の解析から除外した。

a から d の各係数について、7 段階の硬度間での統計的な差を判断するために一元配置分散分析を実施した。有意水準は $p = 0.05$ とした。

4 結果

摩擦係数 μ と、 a から d の各係数の平均と標準誤差を図 3 に示す。

4.1 乾燥 (無潤滑) 条件下での結果

a は柔らかい素材ほど大きな値を示し、その意味で、この傾向は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) と矛盾しない。

b と c は摩擦係数の法線力依存性を示す係数であるので、同時に分析する。素材が指より硬いレベル 1 から 3 については、 b , c 共にほぼ 0 であった。摩擦係数は法線力に依存しない。一方で素材が指と同程度かそれより柔らかい時、 b が負、 c が正であった。摩擦係数は法線力に依存し、法線力が増加するほど摩擦係数は減少した。

d はすべての硬度について有意に正であった。触察速度が上昇するにつれ、摩擦係数は増加した。

4.2 マイカ潤滑条件下での結果

最も硬いレベル 1 を除き、素材が柔らかくなるにつれ a は増加した。マイカ潤滑条件下においても、摩擦係数は縦弾性係数の負のべき乗に比例した。また、乾燥条件下と比較して a と摩擦係数の値が小さく、マイカの潤滑特性が表れた。

b は最も柔らかいレベル 7 の素材のみ有意に負の値を示し、それ以外の素材ではほぼ 0 であった。 c は硬いレベル 1, 2 においてはほぼ 0 であり、柔らかいレベル 5-7 では正であった。硬い素材 (レベル 1, 2, 4) では法線力の指数がほぼ 0 であり、摩擦係数は法線力に依存しない。一方、柔らかい素材 (レベル 5-7) では摩擦係数は法線力に依存した。

d はすべての素材で正であり、硬い素材 (レベル 1, 2) と柔らかい素材 (レベル 6, 7) の間に有意差があった。マイカ潤滑条件下では柔らかい素材ほど摩擦係数の速度依存性は大きかった。しかしその依存性は乾燥条件下と比べて小さかった。

4.3 酸化チタン潤滑条件下での結果

a は最も柔らかい素材 (レベル 7) でのみ他と比べて大きかった。そのほかの硬度では摩擦係数の大きさは素材の硬度に影響されなかった。

レベル 4 を除きすべての硬度について b は負、 c は正の値を示した。柔らかい素材でのみ法線力依存性を示したマイカ潤滑条件下と異なり、酸化チタン潤滑条件下ではほぼすべての素材で摩擦係数は法線力に依存した。

d はすべての素材で値が小さく、異なる柔らかさ間で有意差はなかった。

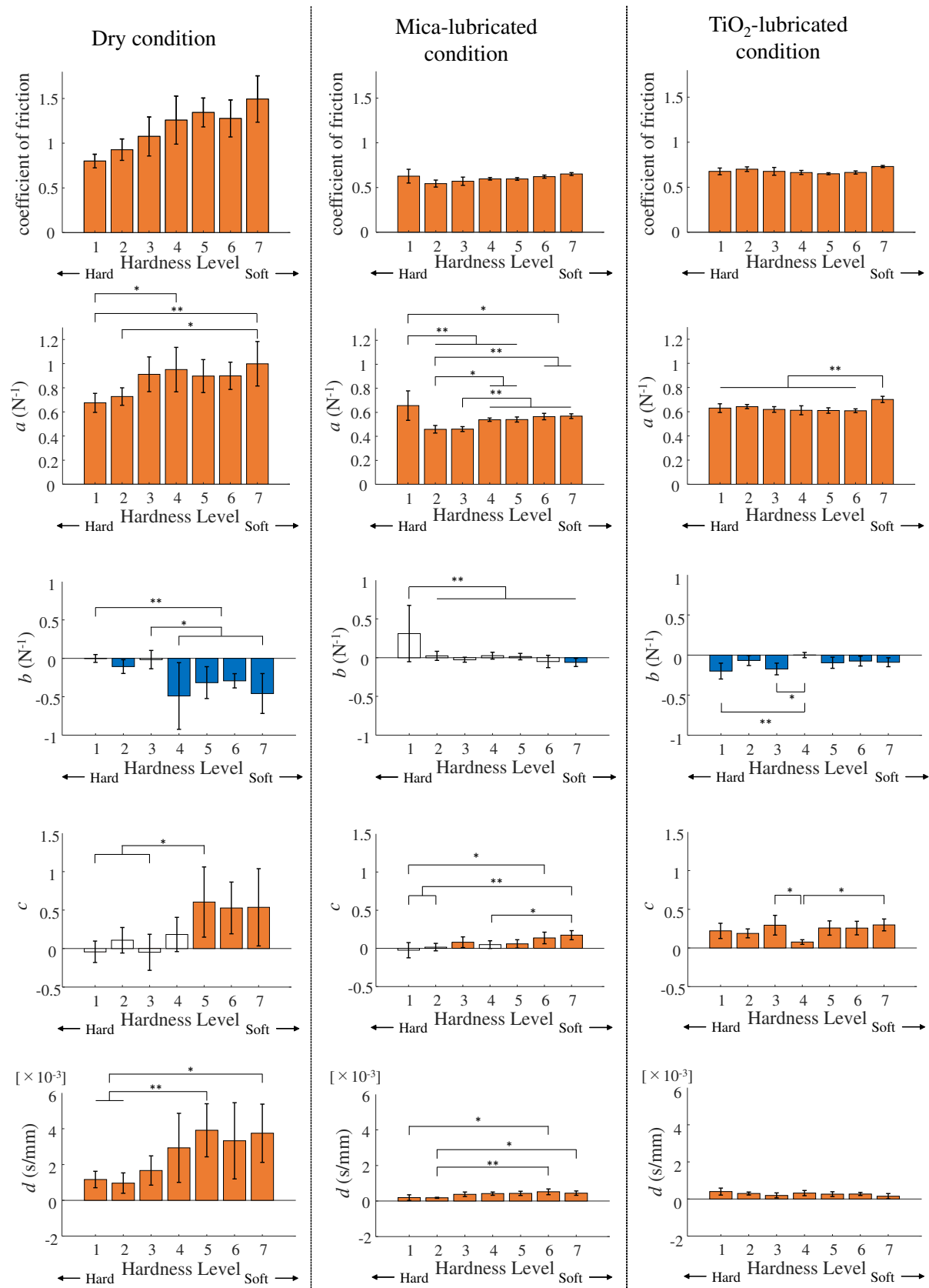


Fig.3 Means and standard errors of cof, a , b , c , and d for each hardness level of the artificial skin model. The orange and blue bars are significantly positive and negative values tested by the t -test with $p < 0.05$, whereas the white bars are not statistically different from zero, *: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$. Left, middle, and right columns represent dry, mica-lubricated, and TiO_2 -lubricated conditions, respectively.

5 議論

乾燥条件で素材が指より硬い場合、摩擦係数は法線力に依存しなかった。指と平面間に生じる凝着摩擦は真実接触面積 A_r に比例する。粗い表面と球との接触においては、平面の表面形状により真実接触面積は法線力に比例すると報告されている [21]。さらに、指と人肌間の接触においても、指紋や肌のキメの影響から真実接触面積が法線力に比例すると考えられる [10]。摩擦係数が法線力に依存しなかったということは、

$$\begin{aligned}\mu &= \frac{\tau A_r}{f_n} \\ &\propto \frac{\tau f_n}{f_n} \\ &= \tau\end{aligned}\quad (7)$$

のように、真実接触面積 A_r が法線力 f_n に比例することにより、凝着摩擦に起因する摩擦係数が定数で表されるということから理解できる。一方、指と同程度かそれより柔らかい表面と指との間の広い範囲での接触においては、指先のわずかな水分が液体ブリッジとして作用し、見かけの接触面積と真実接触面積が一致すると考えられる。そのため、式 (6) が妥当となり、法線力が増加するにつれ摩擦係数は減少した。このように摩擦係数の法線力依存性は素材の柔らかさに依存し、特に指で柔らかい表面を擦る際は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るべきである。

酸化チタン潤滑条件では、乾燥条件と異なり素材柔らかさによらず摩擦係数は法線力に依存した。これは酸化チタンが指や人工皮膚に付着し、指紋や人工皮膚の溝を埋めたことによると考えられる。これにより、素材が硬い場合においても真実接触面積が見かけの接触面積と一致したと考えられる。従って接触面積は図 1 のように法線力のべき乗に比例して変化し、摩擦係数は式 (6) の形で法線力に依存した。

マイカ潤滑条件では、硬い人工皮膚 (レベル 1-4) では摩擦係数は法線力に依存しなかった。さらに、上述の場合と異なり、素材が柔らかい場合においても摩擦係数は法線力にほぼ依存せず、 b はほぼ 0、もしくは最も柔らかい素材においてわずかに負であった。ほぼすべての硬度 (レベル 1-6) において、法線力の指数部分は 0 もしくは正であった。指数部分が負の時、凝着摩擦が支配的であり、正の時変形摩擦が支配的である [13]。マイカの効果により凝着摩擦が減少した。

6 結言

指と人工皮膚間の摩擦に対する素材柔らかさの影響を調査した。乾燥条件では、人工皮膚が指より硬い場合、摩擦係数は法線力に依存しなかった。対称に人工皮膚が指と同程度、もしくは指より柔らかい場合、摩擦係数は法線力が増加するにつれ減少した。表面が摩擦を低減させるマイカで潤滑された場合、柔らかい人工皮膚で摩擦係数はわずかに法線力に依存した。これは主に変形摩擦によるものであり、法線力が増加するにつれ摩擦係数も増加した。酸化チタン潤滑条件では、硬い人工皮膚においても法線力依存性が見られた。これらの法線力依存性の違いは、潤滑が真実接触面積や支配的な摩擦メカニズムに影響を与えたためであると考えられる。肌と人工皮膚の接触では、摩擦係数の硬度依存性は表面の特性により異なることが明らかになった。見かけの接触面積と法線力との間の関係は、特に素材が指よりも柔らかい場合の摩擦を考える際に考慮する必要がある。さらに、素材が指より硬い場合においても、潤滑条件に応じて考慮する必要がある。これらの発見は、指が皮膚などの柔らかい表面を擦る際に生じる摩擦に関して理解を深め、人間とロボットの身体接触を含む支援ロボットなどの表面素材、スキンケア製品や化粧品的设计に役立つだろう。

Acknowledgments

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

参考文献

[1] A. F. El-Shimi, "In vivo skin friction measurements," *Journal Society Cosmetic Chemist*, vol. 28, no. 2, pp. 37-51, 1977.

[2] R. K. Sivamani, J. Goodman, N. V. Gitis, and H. I. Maibach, "Friction coefficient of skin in real-time," *Skin Research and Technology*, vol. 9, no. 3, pp. 235-239, 2003.

[3] A. A. Koudine, M. Barquins, P. Anthoine, L. Aubert, and J. L. Lévêque, "Frictional properties of skin: Proposal of a new approach," *International Journal of Cosmetic Science*, vol. 22, no. 1, pp. 11-20, 2000.

[4] M. Zhang and A. F. T. Mak, "In vivo friction properties of human skin," *Prosthetics and Orthotics International*, vol. 23, no. 2, pp. 135-141, 1999.

[5] R. Fagiani, F. Massi, E. Chatelet, J. P. Costes, and Y. Berthier, "Contact of a finger on rigid surfaces and textiles: Friction coefficient and induced vibrations," *Tribology Letters*, vol. 48, no. 2, pp. 145-158, 2012.

[6] K. Duvefelt, U. Olofsson, C. M. Johannesson, and L. Skedung, "Model for contact between finger and sinusoidal plane to evaluate adhesion and deformation component of friction," *Tribology International*, vol. 96, pp. 389-394, 2016.

[7] W. Tang, S. rong Ge, H. Zhu, X. chuan Cao, and N. Li, "The influence of normal load and sliding speed on frictional properties of skin," *Journal of Bionic Engineering*, vol. 5, no. 1, pp. 33-38, 2008.

[8] P. F. D. Naylor, "The skin surface and friction," *British Journal Dermatology*, vol. 67, no. 7, pp. 239-248, 1955.

[9] M. Egawa, M. Oguri, T. Hirao, M. Takahashi, and M. Miyakawa, "The evaluation of skin friction using a frictional feel analyzer," *Skin Research and Technology*, vol. 8, no. 1, pp. 41-51, 2002.

[10] M. J. Adams, B. J. Briscoe, and S. A. Johnson, "Friction and lubrication of human skin," *Tribology Letters*, vol. 26, no. 3, pp. 239-253, 2007.

[11] B. Dzidek, M. J. Adams, Z. Zhang, S. Johnson, S. Bocheureau, and V. Hayward, "Role of occlusion in non-coulombic slip of the finger pad," in *Haptics: Neuroscience, Devices, Modeling, and Applications*, 2014, pp. 109-116.

[12] S. Derler, L.-C. Gerhardt, A. Lenz, E. Bertaux, and M. Hadad, "Friction of human skin against smooth and rough glass as a function of the contact pressure," *Tribology International*, vol. 42, pp. 1565-1574, 2009.

[13] D. Mahdi, A. Riches, M. Gester, J. Yeomans, and P. Smith, "Rolling and sliding: Separation of adhesion and deformation friction and their relative contribution to total friction," *Tribology International*, vol. 89, pp. 128-134, 2015.

[14] Y. Fujii, S. Okamoto, and Y. Yamada, "Friction model of fingertip sliding over wavy surface for friction-variable tactile feedback panel," *Advanced Robotics*, vol. 30, no. 20, pp. 1341-1353, 2016.

[15] J. van Kuilenburg, M. A. 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*, vol. 229, no. 3, pp. 243-258, 2015.

[16] M. J. Adams, S. A. Johnson, P. Lefèvre, V. Lévesque, V. Hayward, T. André, and J.-L. Thonnard, "Finger pad friction and its role in grip and touch," *Journal of The Royal Society Interface*, vol. 10, no. 80, p. 20120467, 2013.

[17] A. Imaizumi, S. Okamoto, and Y. Yamada, "Friction perception resulting from laterally vibrotactile stimuli," *Robomech Journal*, vol. 4, no. 1, p. 12, 2017.

[18] H. Hasegawa, S. Okamoto, E. Hatem, and Y. Yamada, "Stochastic relationships between the normal and shear interaction forces during tactile exploration of textures," in *Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 2018, pp. 3033-3038.

[19] H. Hasegawa, G. E. S. Okamoto, and Y. Yamada, "Phase difference between normal and shear forces during tactile exploration represents textural features," *IEEE Transactions on Haptics*, 2019, doi: 10.1109/TOH.2019.2960021.

[20] R. Shimizu and Y. Nonomura, "Preparation of artificial skin that mimics human skin surface and mechanical properties," *Journal of Oleo Science*, vol. 67, no. 1, pp. 47-54, 2018.

[21] J. A. Greenwood and J. H. Tripp, "The elastic contact of rough spheres," *Journal of Applied Mechanism*, vol. 34, no. 1, pp. 153-159, 1967.