

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月6日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06040

研究課題名(和文) 指のすべり動作における摩擦と操作感の定量的相関の確立

研究課題名(英文) Establishment of quantitative correlation between friction and feeling of operation in sliding motion of finger

研究代表者

青木 才子 (Aoki, Saiko)

東京工業大学・物質理工学院・准教授

研究者番号：30463053

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：指への摩擦刺激と操作感との相関を明らかにするため、分子膜の幅や間隔、被覆率、配置角度が異なる種々のパターンニング表面を用いて複数の研究対象者による摩擦測定を実施した。ガラス面からパターン面への移行に伴うせん断強さおよび荷重の変化率を算出すると、両変化率ともに分子膜の被覆率に依存することがわかった。指と表面のせん断強さを指への摩擦刺激とし、荷重の変化を摩擦刺激に対する半意識的な力学的応答(操作感)とみなすと、刺激に対する応答はせん断強さの変化率だけでなく、指のすべり速さや分子膜パターンなど刺激の与え方も関係することが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ストライプ状分子膜パターン表面が指の摩擦特性に与える影響に着目し、指への摩擦刺激だけでなくその刺激に対する力学的応答は分子膜パターンの被覆率や角度などの各種因子に依存することを明らかにした。近年、タブレット端末のタッチパネルディスプレイにはテクスチャや超音波振動により触感を制御するインターフェースが適用されている中で、分子膜のパターンニングにより指の摩擦と操作感を制御することが可能になれば、さらにユーザビリティに優れた機能性表面の開発が期待できる。

研究成果の概要(英文)：In order to clarify the correlation between the friction stimulus on the finger and the feeling of operation, the finger friction measurement was performed with three dozen participants using various stripe-patterned glass surfaces with a molecular film having different widths, intervals, coverage, and orientation. Since the rate of change (ROC) in shear strength and normal load due to the sliding of the finger from the glass to the patterned surface was calculated, both ROCs depended on the coverage of the molecular film. Assuming that the shear strength of the finger and the surface is a friction stimulus to the finger and the change in load is regarded as a semi-conscious mechanical response (the feeling of operation) to the friction stimulus, the response to the stimulus was dependent not only on the ROC in shear strength but also on how to give the stimuli such as sliding speed and patterning of the molecular film.

研究分野：トライボロジー, 化学工学, 潤滑油

キーワード：指の摩擦 トライボロジー 分子膜 ストライプパターン せん断強さ

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

「人間にやさしい」工学・ものづくりを目指して、各種機械は性能や機能の高性能化だけでなく優れたユーザビリティを付与するため、快適な操作感などより「リアルな触感」を与えるインターフェースの開発が求められている。人間は無意識のうちに指と物との間に生じる摩擦の大小により物体の正体を把握すると同時に、その物体に対する様々な感覚・感情が生じている。例えば、無機質で滑らかなガラス面に比べ、凸凹やザラザラ感がある面の方が高級感や風合い感などリアリティが増すことが感覚的に理解されており、指の摩擦は人間の感覚や感性を制御する因子と成り得る。すなわち、どのような摩擦を付与することが優れたユーザビリティにつながるのかを理解し、指の摩擦と人間の感性の定量的相関の解明へ取り組むことが重要な鍵となる。

指の摩擦と人間の感覚に関わる部分の定量的評価について、表面性状が異なる数種類の材料表面を指でなぞった際の感覚を統計的に評価するなど単なる材料の感性評価にとどまるものが多く、指の摩擦と操作感の関連性を定量的に評価した報告例は極めて少ない。例えば、半面のみを分子膜で被覆したガラス表面において速度一定の条件下で指をすべらせると、指が表面の摩擦抵抗の変化を瞬時に検知した結果、速度一定でのすべりを維持するために分子膜を被覆した面において指への負荷重が増大する。これは、表面の変化という知覚情報を与えた場合に指の動作がどのように反応し、その結果、摩擦抵抗や荷重などの力学的変化として現れることを示している一方で、表面の摩擦抵抗の差異によりホールド感や安定感など操作感が異なるために意識的に指の動作を制御している可能性も否定出来ない。すなわち、指の摩擦と操作感の関連性を定量的に評価するためには、数 nm 程度の分子膜の変化に伴う摩擦力や荷重、接触面積など力学的変化に応じて、指の反射的な動きの制御やそれに伴う操作感を力学データとして取得する必要があり、分子膜の被覆面積や膜厚など制御したパターンニング表面において指の摩擦特性と操作感の関連性を定量的に評価することが重要となる。

そこで、本研究では分子膜の表面密度や高さ分布を制御したパターンニング表面における指の摩擦現象を明らかにすると同時に、感性工学的見地から摩擦と操作感の双方に影響を与える潜在的刺激因子を徹底的に洗い出すことにより、指の摩擦特性と操作感など人間の感覚・感性との定量的相関の確立を目指す。

2. 研究の目的

本研究では、分子膜のパターンニング表面における指のすべり摩擦特性を明らかにして、摩擦抵抗により生じる操作感との定量的相関を確立することを目標とする。

(1) 指のすべり動作における指の接触状態の *in situ* 観察と摩擦特性の評価

指のすべり操作の 3 軸動的測定を可能とする圧電型 3 分力センサによる平板型摩擦測定装置を用いて、指のすべり動作時における摩擦力および荷重の力学データと指の接触面積の測定を実施し、荷重、摩擦力の力学データと指の接触面積の変化との関連性を明らかにする解析方法の探索を行う。

(2) 分子膜のパターンニング表面の作製と最適設計指針の検討

自己組織化単分子膜 (SAM) を用いて、湿式法やリソグラフィ法などにより分子膜の表面密度、高さ分布、ストライプや格子状などのパターンを制御した表面を作製する。タッチトライボロジー試験機による摩擦特性と操作感の評価に基づき、分子膜パターンニング表面の作製方法の最適化を目指す。

(3) 指の摩擦特性と操作感の定量的相関の確立

指先の摩擦特性と操作感の双方に関連する刺激因子を洗い出し、力学データによる操作感尺度の定量化を検討する。分子膜の表面密度、高さ分布が異なる種々のパターンニング表面における指の摩擦測定により得られた結果を基に、指の摩擦と操作感に関わる潜在的刺激因子を抽出し、両者の定量的相関について提案する。

3. 研究の方法

(1) 指のすべり動作における指の接触状態の *in situ* 観察と摩擦特性の評価

指のすべり動作における荷重と摩擦力は圧電型 3 分力センサを中心に設置した平板型摩擦測定装置を用いて測定した。この平板型摩擦測定装置の上に汎用の Android® タブレット端末を設置した。タブレット端末には端末操作における指の接触点座標と時刻を取得する自作のアプリケーションソフトが組み込まれており、指の接触から離れるまでの一連の動作（指を固定→すべり（速度一定）→停止→指を離す）の位置データ（x, y 座標および時間）と摩擦測定装置よ

り得られる力学データ（荷重および摩擦力）を同期して取得することが出来る．各種分子膜パターンニングを施したガラス基板をタブレット表面に貼付し，右手人差し指を右方向に任意の一定速度で滑らせることにより各種データの測定を行った．

また，荷重，摩擦力の力学データと指の接触面積の変化との関連性を明らかにするために，ink-stamping 法により任意の荷重における基板表面に対する指の接触面積を測定し，各研究対象者について指の接触面積 A を荷重 W の関数として表した．さらに， $\tau = F/A$ より，摩擦試験で取得した荷重と摩擦力の平均値を用いて，単位面積当たりの摩擦力 F である界面せん断強さ τ を算出した．

(2) 分子膜のパターンニング表面の作製と最適設計指針検討

自己組織化単分子膜 (SAM) の被覆部分の幅や間隔，被覆率をパラメータとするストライプ状のパターンニング表面を作製するため，①反応性イオンエッチング法，②テープマスキング法の2種類の成膜方法を実施した．ガラス基板として，タッチパネルディスプレイ等に用いられる汎用の無アルカリガラス（イーグル XG®）を用いた．①では，初めに清浄ガラス基板を Octadecyltrichlorosilane (OTS) 溶液に浸漬して，OTS-SAM をガラス表面に形成した．OTS-SAM を形成した試験片表面を種々のストライプ状のパターンが施されたステンレス製ステンシルマスクで覆いエッチング処理を行うことにより，露出部分の分子膜が除去され，マスクの被覆部分の分子膜のみ試験片表面に残り，幅・間隔が制御されたストライプ状パターンニング表面を作製した．また，②では，ストライプ状に切断した耐溶剤性のマスキングテープを清浄ガラス基板に貼り付けた後に OTS 溶液に浸漬することにより，テープで被覆されていない領域のみ分子膜が形成する．テープの幅・間隔，方向性を変化させて，ストライプ状分子膜の成膜パターンが異なる種々の試験基板を作製した．①および②により作製された分子膜パターンニング表面を用いて指の摩擦特性を実施した．

(3) 指の摩擦特性と操作感の定量的相関の確立

種々の分子膜パターンニング表面における指の摩擦測定により，指の摩擦特性とガラス基板表面のせん断抵抗の変化に起因する摩擦刺激に対する力学的応答を明らかにするために，各試験の人数を合わせて計 30 名程度の研究対象者による指の摩擦測定を実施した．研究対象者は主に 20 代の男女で構成される．得られた結果を基に，指の摩擦特性や摩擦刺激に対する力学的応答の双方に影響を及ぼす分子膜パターンニング関連因子の定量的相関を検討した．

4. 研究成果

(1) 指のすべり動作における指の接触状態の in situ 観察と摩擦特性の評価

図 1 に示すストライプ状の分子膜をテープマスキング法によりガラス基板表面に作製して，十名の研究対象者による指の摩擦測定を実施した．摩擦試験結果の一例を図 2 に示す．図 2 より，中央の 3 つの領域に着目すると，ガラス表面の状態が $O_1 \rightarrow G_1$ ， $G_1 \rightarrow O_2$ のように変化するとつれて，各領域の境界上でのみ摩擦力および荷重が急激に変化することが観察された．このような荷重の増減は，指をすべらせている間に指との接触界面にかかるせん断強さが変化したことにより，人が半意識的に加える荷重を制御した結果であると推察した．そこで，せん断強さの変化を指への摩擦刺激とし，せん断強さの変化に対する荷重の変化を摩擦刺激に対する人の力学的応答と仮定して，摩擦刺激とそれに対する人の力学的応答の相関性について評価を試みた．中央の 3 つの領域 (O_1, G_1, O_2) について摩擦力，荷重のデータをそれぞれ抽出し平均し，式(1)より， $O_1 \rightarrow G_1$ ， $G_1 \rightarrow O_2$ の 2 つの領域の変化における荷重およびせん断強さの差分をそれぞれ算出した．さらに，式(2)より，荷重とせん断強度について変化率 W_{ROC} ， τ_{ROC} を算出した．

$$O_1 \rightarrow G_1: \Delta W = W_{G_1} - W_{O_1}, \Delta \tau = \tau_{G_1} - \tau_{O_1}, G_1 \rightarrow O_2: \Delta W = W_{O_2} - W_{G_1}, \Delta \tau = \tau_{O_2} - \tau_{G_1} \quad (1)$$

$$W_{ROC} = \frac{\Delta W}{W_{First}} = \frac{W_{Second} - W_{First}}{W_{First}}, \tau_{ROC} = \frac{\Delta \tau}{\tau_{First}} = \frac{\tau_{Second} - \tau_{First}}{\tau_{First}} \quad (2)$$

図 3 はすべり速度 1.5, 4.5, 9.0, 12 cm/s において全ての研究対象者より得られた W_{ROC} と τ_{ROC} の関係を示している．全てのすべり速度において， W_{ROC} と τ_{ROC} には負の曲線的な相関が観察された．また，すべり速度の差異によるデータの分布状態を比較すると，速度の増大に伴い， $W_{ROC} = 0$ 付近に分布するデータの頻度が増加する一方， $\tau_{ROC} = 0$ 付近でのデータ分付に有意差は見られなかった．これより，すべり速度に関わらずせん断強さ変化率で表される摩擦刺激は変化なく指で検知される一方，その刺激に対する力学的応答としての荷重変化率はすべり速度の影響を受けやすいことが明らかになった．

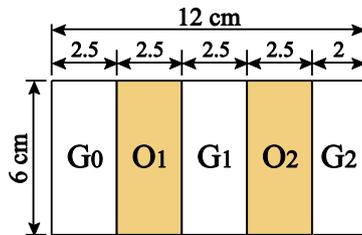


図1 分子膜パターニング表面

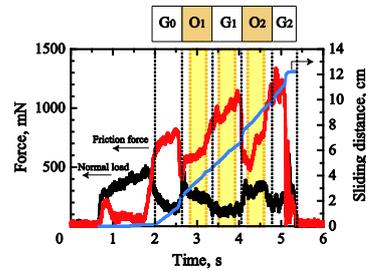
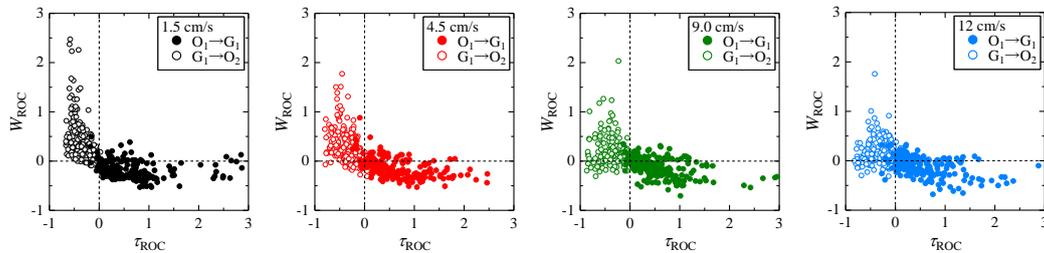


図2 摩擦試験結果およびデータ抽出法



(a) 1.5 cm/s

(b) 4.5 cm/s

(c) 9.0 cm/s

(d) 12 cm/s

図3 セン断強さ変化率と荷重変化率の関係

(2) 分子膜のパターニング表面の作製と最適設計指針の検討

図4に示すように、反応性イオンエッチング法により分子膜の幅 (w), 間隔 (i), 被覆率 (c) が異なる 12 種類のストライプ状パターニング試験片を作製した. これら試験片を用いて, 10 名の研究対象者による指の摩擦測定を実施した. 摩擦力および荷重のデータを抽出・平均化し, 各パターニング表面におけるせん断強さ変化率 τ_{ROC} および荷重変化率 W_{ROC} を算出した. 全ての研究対象者から得られた τ_{ROC} を平均し, 各試験片の分子膜被覆率に対してプロットした図5に示す. 図5より, 被覆率の増大に伴い τ_{ROC} は減少し, 被覆率が大きいパターニング表面では τ_{ROC} が大きくなることを示した. すなわち, 被覆率が小さくなるほどガラス面とパターン面との差異が小さくなり, 指による摩擦刺激の知覚しにくくなることが伺える. また, 図6は各試験片の分子膜被覆率と W_{ROC} の関係を示す. 図6より, 被覆率の増大とともに W_{ROC} も増大する結果となり, 被覆率が刺激に対する半意識的な応答に影響を及ぼすことがわかった. 図7は τ_{ROC} と W_{ROC} の関係を示す. 相関係数が -0.82 程度の強い負の相関関係が観察された. τ_{ROC} の絶対値はパターニング表面に起因する摩擦刺激の強さと見なすことができる一方, W_{ROC} は半意識的な力学的応答の強さを示すと仮定すると, 摩擦刺激が大きいほど半意識的な応答が顕著に現れることが起こりやすいことが考えられる. さらに, 指への摩擦刺激として, 分子膜の被覆率が重要なパラメータであることも示唆された.

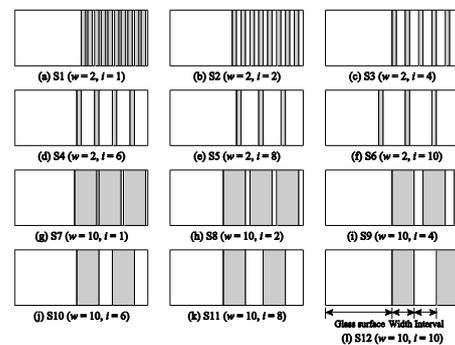


図4 幅 w , 間隔 i , 被覆率 c が異なる 12 種類のストライプ状パターニング試験片

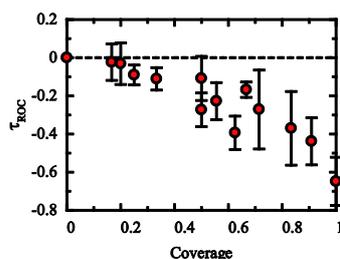


図5 分子膜被覆率とせん断強さ変化率の関係

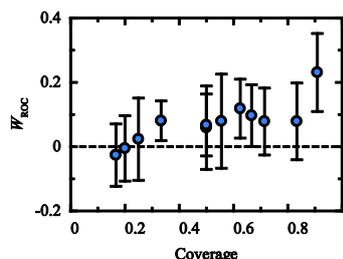


図6 分子膜被覆率と荷重変化率の関係

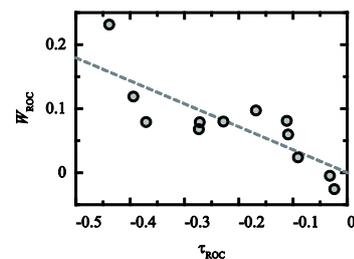


図7 セン断強さ変化率と荷重変化率の関係

(3) 指の摩擦特性と操作感の定量的相関の確立

図8に示すように, テープマスキング法により, 分子膜の方向性 (θ), 被覆率が異なる 12

種類の分子膜パターンニング試験片を作製し、3名の研究対象者による指の摩擦特性を実施した。得られた結果を評価する際、新たに周波数 $f(=v\cos(\theta/p))$ を導入した。ここで、 v はすべり速度、 θ は直交方向に対する分子膜の角度(方向性)、 p はピッチ($p=w+i$)である。得られた結果からせん断強さ変化率 τ_{ROC} および荷重変化率 W_{ROC} を算出し、 f との関係性を評価した。図9は3名の研究対象者から得られた τ_{ROC} の平均値を f についてプロットした図を示す。周波数の増大に伴い、 τ_{ROC} はほぼ一定の値に収束した。周波数はすべり速度の影響が大きいいため、周波数の大きい、すなわち、すべり速度が大きい場合は知覚される摩擦刺激が小さくなることを示唆している。また、分子膜被覆率が大きいほど一定の値への収束が遅くなる傾向にあった。分子膜被覆率が大きい表面は摩擦刺激が強くなるため、すべり速度が大きくなってある程度指での近くが維持されていることが伺える。図10は W_{ROC} と f の関係性を示す。と同じく、周波数の増大に伴い収束傾向が観察された。周波数増大に伴う摩擦刺激の知覚の消失により、半意識的な力学的応答も消失していくことが示唆される。

以上の結果を踏まえ、摩擦刺激としてせん断強さ変化率、刺激に対する半意識的な応答(操作感)として荷重変化率に着目し、分子膜の被覆率、方向性、すべり速度のパラメータによる影響について以下に示す結果が得られた。

① せん断強さ変化率

- ・ ストライプ状分子膜を施したガラス表面において、分子膜パターンによるせん断強さ変化率は分子膜被覆率の増加に伴って増大する。
- ・ 非常に速いすべり動作では、せん断強さ変化率が0に近づく。

② 荷重変化率

- ・ 分子膜被覆率が1に近い場合、せん断強さの大きな変化に伴い、荷重変化率は大きくなる；被覆率が0に近い場合、荷重変化率は0に近づく。
- ・ 荷重変化率はせん断強さの変化度合いのみならず、すべり速度や分子膜パターンの方向性による刺激の与え方の違いにも影響される。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

[1] Saiko Aoki, Rina Yanagisawa. Unconscious response to friction stimulus caused by the change in shear strength between a finger and striped glass surface with a self-assembled monolayer, Tribology International, Volume 135, Page 143-151, Feb. 16th, 2019, 査読有。

[学会発表] (計 5 件)

[1] 柳澤理奈, 青木才子. 分子膜被覆された固体表面における指の摩擦特性に与えるすべり速度と方向の影響, トライボロジー会議 2016 秋新潟, 2016 年 10 月 14 日。
 [2] Rina Yanagisawa, Yimeng Liu, Saiko Aoki, Mechanical Response Induced by Change in Shear Strength at the Sliding Contact between a Finger and a Molecular Layer-Coated Solid Surface, 42th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, Lyon, France, Sep. 5th, 2017.

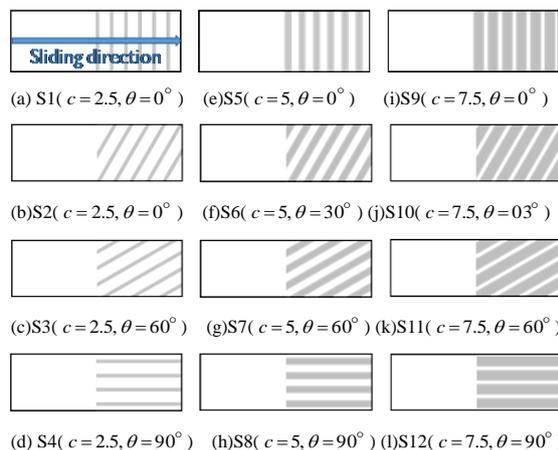


図8 方向性 θ , 被覆率 c が異なる 12 種類の分子膜パターンニング試験片

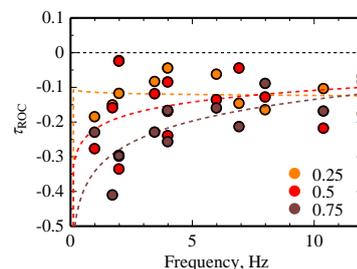


図9 周波数とせん断強さ変化率 (ガラス→パターン)

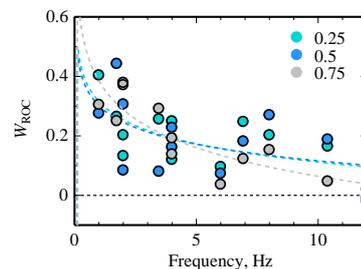


図10 周波数と荷重変化率 (ガラス→パターン面)

- [3] Yimeng Liu, Rina Yanagisawa, Saiko Aoki, Friction Characteristics of a Finger Pad Slid on the Solid Surfaces Coated with Organic Molecular Layer with Different Pattern intervals and Width, World Tribology Congress 2017, Beijing, China, Sep. 21th, 2017.
- [4] Yimeng Liu, Saiko Aoki, Friction Properties of Finger Sliding against Solid Surfaces Coated with Organic Molecular Layer with Different Pattern Width, Interval and Direction, Sustainable Tribology Conference 2017 AMAMI (STCA2017), Amami, Japan, Oct 14th, 2017.
- [5] 劉 依蒙, 青木 才子, 異方性分子膜パターンを有する固体表面における指の摩擦特性と摩擦刺激に対する応答, トライボロジー会議 2018 秋 伊勢, 伊勢市観光文化会館, 2018 年 11 月 7 日.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
出願年 :
国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
取得年 :
国内外の別 :

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名 :
ローマ字氏名 :
所属研究機関名 :
部局名 :
職名 :
研究者番号 (8 桁) :

(2)研究協力者

研究協力者氏名 :
ローマ字氏名 :

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。