

補助事業番号 2021M-151

補助事業名 2021年度 所望の触覚特性を実現する表面テクスチャ最適設計手法の開発
補助事業

補助事業者名 豊田工業大学・教授・下田昌利

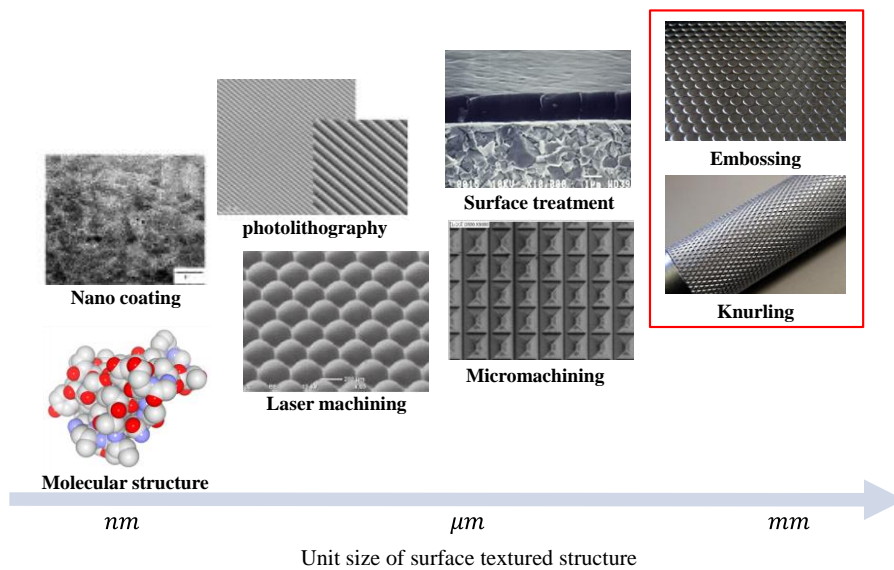
1 研究の概要

本研究で対象とするマクロな表面テクスチャは人が指腹で触れることにより表面状態が認識される。皮膚内部には触覚に関係する4種の機械受容器が存在し、皮膚変形や摩擦による振動刺激に反応する特性を持つ。本研究では有限要素法により指と表面テクスチャとの摺動解析を行い、動摩擦係数や各機械受容器の応力波形を評価するが、そのための指紋と機械受容器を含む新たな3次元指モデルと摺動解析条件を構築した。

最適化手法としては、変分法に基づくノンパラメトリック手法と実験計画法に基づくパラメトリック手法(応答曲面法)の2つを構築した。ノンパラメトリック手法の開発では摺動に対する感度関数を導出し、関数空間の勾配法を用いて無限自由度の最適自由表面テクスチャを求める理論を構築した。一方、パラメトリック手法には実験計画法に基づく応答曲面法を利用する方法を構築し、最適化システムを開発した。そこでは形状のパラメータ化が肝要であり、如何に少ないパラメータで表面テクスチャを表現するかについての検討も行った。最適化計算には初期表面テクスチャが必要であるが、自然界の生物や植物の表面テクスチャを詳細に観察、計測してデータベース化した。

2 研究の目的と背景

近年、コストや機能に加え、デザインや高触感等の高付加価値の付与が製品開発上の重要な要素となっている。高付加価値技術の1つに物体表面に規則的または不規則な凹凸を与える表面テクスチャリングがあり、ナノからマクロまでの加工技術が開発されている。それにより外観や触感の変化、摺動や潤滑性の変更が可能となり、製品開発に積極的に利用されている。加工技術の発展は著しいが、その反面、設計手法の研究は殆ど行われていないのが現状である。本研究では摩擦を含む触覚特性や触感に影響を与えるマクロな表面テクスチャを研究対象とする。ミクロからミリオーダーのエンボス加工やシボ加工などが該当するが、様々な製品や部品に利用されている(図1)。その設計は経験に基づく試行錯誤なアプローチによって行われており、コストと時間を要し、得られる性能も限定されている。高性能で高付加価値の表面テクスチャの設計を経済的且つ高効率で実現するためには計算機と数値計算、及び最適設計理論を利用した設計支援システムの開発が不可欠であり、表面テクスチャを自動設計する最適設計手法、及びそれに基づく最適化システムの開発を本研究の大目的とした。



*トライボロジー特性改善のための表面テクスチャリング(東京理科大学 佐々木信也)を改変

図1 ナノからマクロサイズまでの表面テクスチャリング

3 研究内容

所望の触覚特性を実現する表面テクスチャ最適設計手法の開発
<http://www.toyota-ti.ac.jp/Lab/Kikai/solid/index.html>

① 先行研究の調査

本研究に関連する先行研究を調査し、モデリングと手法を把握した。同時に、本研究で開発する手法の新規性を確認した。この調査結果は学会発表論文へ反映させた。

② 摩擦実験と感覚受容器を含む指モデルの構築

- ・表面テクスチャサンプルを入手し、動的な摩擦係数を計測した。
- ・指内に存在する触覚センサー(機械受容器)と指紋を含む3次元詳細有限要素モデルを

①の先行研究を基に構築した(図2)。

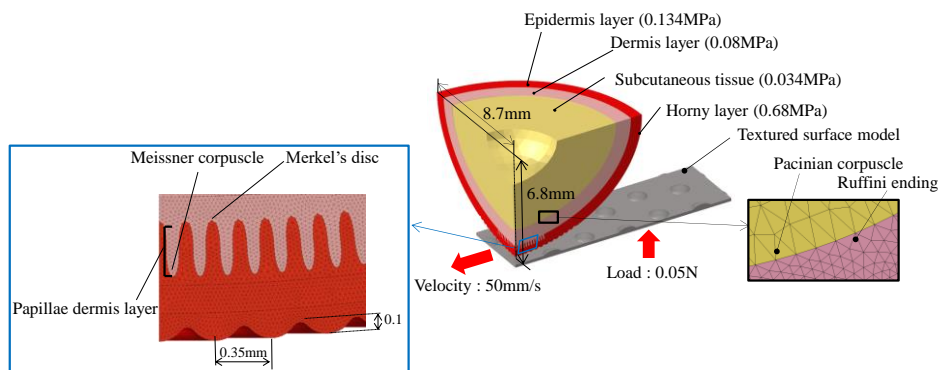


図2 指紋と4種の機械受容器を含む3次元接触指摺動解析モデル

③ノンパラメトリック最適化手法の構築

- ・接触・摺動解析で得られる摩擦係数と目標摩擦係数の二乗誤差を目的関数にし、表面形状を設計変数にした形状最適化問題を定式化し、感度関数を理論的に導出した。このとき、接触・摺動解析の支配方程式と表面テクスチャの体積を制約条件に加えた。
- ・得られた感度関数の数値計算のためのアルゴリズムを開発。そこでは随伴方程式を含むため、その数値解法を構築した。
- ・形状設計変数の決定のための関数空間の勾配法を構築した。最適形状変動量分布はベクトル変数を決定する関数空間のH1勾配法で求め、正定値マトリクスには剛性マトリクスを利用した。

④パラメトリック最適化手法(応答曲面法)の構築

- ②で構築した指と表面テクスチャの3D詳細有限要素モデルを用いて接触・摺動解析を行い(図3)、応答曲面法に基づくパラメトリック最適化手法を構築した(図4)。

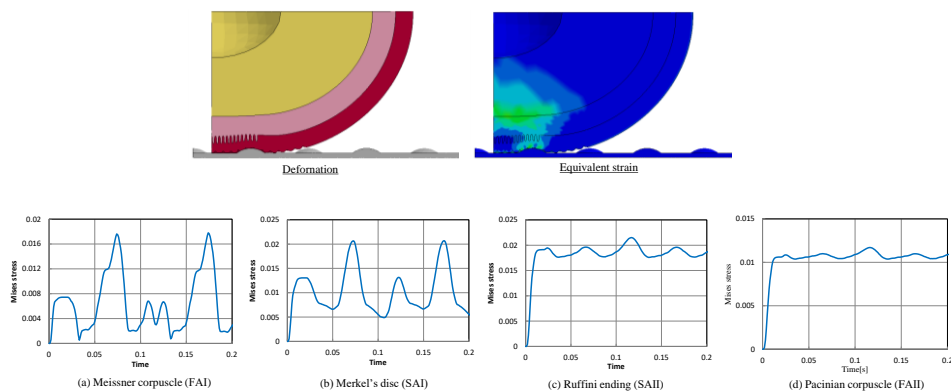


図3 接触摺動時の変形と相当ひずみ分布, 及び機械受容器の相当の応力時刻歴の例

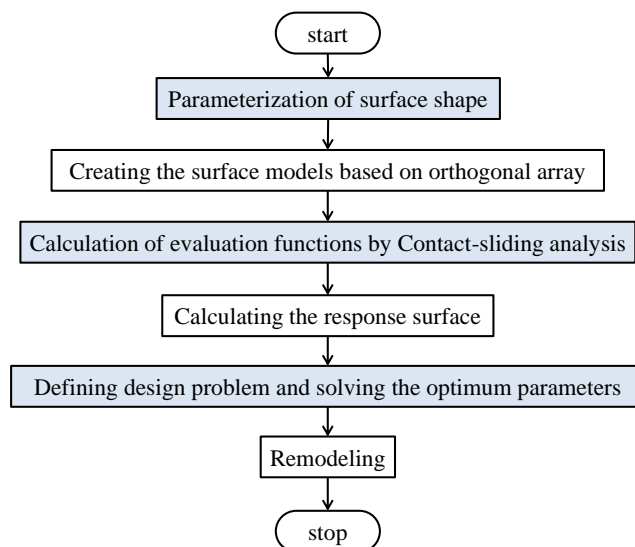


図4 応答曲面法に基づくパラメトリック最適化システムの流れ

⑤自然界の表面テクスチャの計測とモデリング

購入したSEMレンズを所有のデジタルマイクروسコープに接続し、昆虫や鳥類、貝類の表面テクスチャ(マイクロ)構造を観察し、3D表面モデルへの適用性を確認.

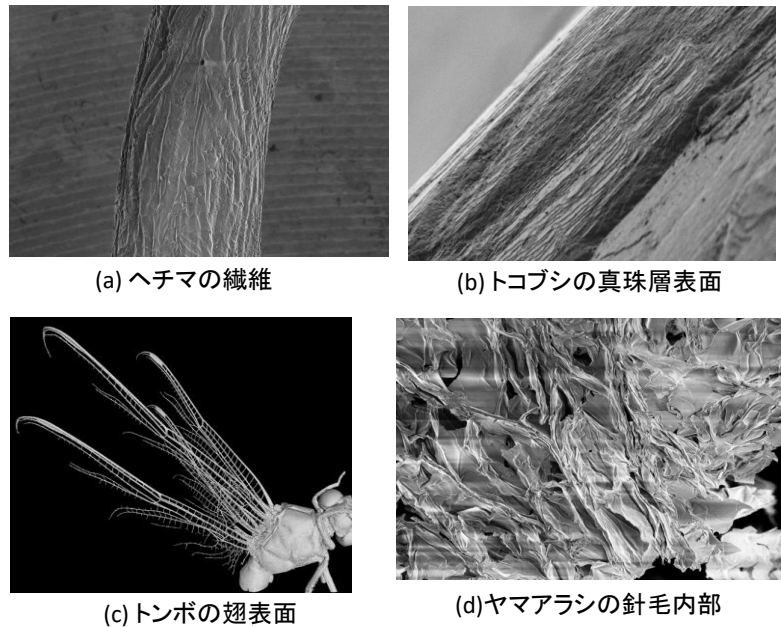


図5 自然界の表面テクスチャのSEM写真の例

⑥表面テクスチャ設計システムの構築

上記④で構築した手法を基に、汎用有限要素コードとプリポスト処理ソフト、及び応答曲面法を組み合わせた汎用表面テクスチャ設計システムを構築.

⑦基本的な表面テクスチャ設計問題への適用による手法の検証

構築した最適化システムを基本的な3次元の表面テクスチャと指モデルへ適用し、有効性を確認(図6).

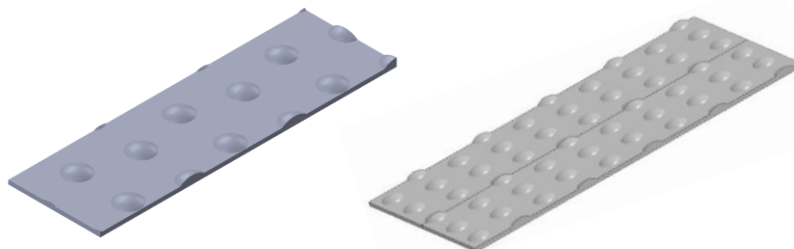


図6 応答曲面法に基づくパラメトリック最適化の計算例(左:FA IIユニットの応答の最大化 & FA Iユニットの応答を制約, 右:平均摩擦係数の最大化 & 平均摩擦振幅と最低摩擦係数を制約)

⑧成果の学会発表

上記④について、講演論文にまとめ、学会発表と学術雑誌への投稿を行った。

⑨目標特性を変えた表面テクスチャの応用計算による実用性の検証

構築した最適化システムを幾つかの設計問題へ適用し、有効性を確認。

⑩表面テクスチャの試作と検証試験

計算結果を3Dプリンターによって試作し、接触感覚を評価。

4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

あらゆる製品の表面に何らかの凹凸(表面テクスチャ)があり、その形状は製品に摩擦や触り心地由来の機能や付加価値を与える他、軽量化や環境負荷へも影響を及ぼす。本研究では指と接触するマクロな表面テクスチャに注目し、設計目的に応じて設定される所望の摩擦特性や触感に通じる指内の機械受容器(刺激に反応するセンサー)に生じる応力波形特性を実現する3次元表面テクスチャを求める最適化手法とそれに基づく最適設計システムの開発を行った。これにより従来の経験や勘に基づく試行錯誤的な設計ではなく、計算機による最適設計支援システムが実現される。また、性能の向上に加え、経済的、効率的な設計が可能となる他、技術伝承問題の解決にも役立つと考えられる。将来、指内部の機械受容器と触覚が陽に関係づけられれば、摩擦特性に加え、感性設計も可能になるため、本研究はその礎となる。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

これまで構造最適化の分野の研究、特に形状最適化手法の開発とその構造設計への応用の研究を巾広く行ってきた。ソリッド、シェル、骨組、膜構造体といったあらゆる構造形態体を対象に、剛性、強度等の力学特性を評価関数にした形状最適設計法の研究において、多くの手法の提案を行ってきた。今回の研究はこれまでの研究を基に、表面テクスチャに発展させたものである。表面テクスチャの最適設計に関する研究はこれまでにない新規で独自の研究である。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

国内学会で研究発表を行い(1回)、学術雑誌に論文投稿を行い、それぞれ講演論文集、論文として出版。

- ① 下田昌利, 朝日悠河, 指内の機械受容器応力を評価関数とする表面テクスチャ設計手法, 日本機械学会2021年度年次大会(2021.9.5-8, オンライン).
- ② 下田昌利, パラメトリック形状最適化手法を用いた表面テクスチャリング, トライボロジスト, 67巻5号(2022/05/15発行予定).

7 補助事業に係る成果物

(1)補助事業により作成したもの

・汎用有限要素コードとプリポスト処理ソフト, 及び応答曲面法を組み合わせた汎用表面テクスチャ設計システム

・前述の講演論文1編, 論文1編

(<http://www.toyota-ti.ac.jp/Lab/Kikai/solid/index.html>)

(2)(1)以外で当事業において作成したもの

該当なし.

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名: 豊田工業大学(トヨタコウギョウダイガク)

住 所: 〒468-8511

愛知県名古屋市天白区久方2-12-1

担 当 者: 豊田工業大学 教授 下田昌利(シモダマサトシ)

担 当 部 署: 固体力学研究室(コタイリキガクケンキュウシツ)

E - m a i l: shimoda@toyota-ti.ac.jp

U R L: <http://www.toyota-ti.ac.jp/Lab/Kikai/solid/index.html>