

令和 5 年 6 月 17 日現在

機関番号：32685

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04246

研究課題名(和文)二段階突起物による軟質で滑りやすい物体のグリップ性能向上と粒子法シミュレーション

研究課題名(英文) Enhancement of Gripping Characteristics for Soft and Slippery Objects Using Double-Scale Protrusions and MPS Simulation

研究代表者

高三徳 (Gao, Sande)

明星大学・理工学部・教授

研究者番号：00337271

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、一段階突起物として放電加工によりミリメートル寸法の三角プリズム型および四角錐型突起物を作製し、その上にスパッタエッチングによりマイクロメートル寸法の微細な円錐状突起物を形成して二段階突起物とした。これらの突起物試験片を用いてマシンオイルを塗布した軟質シリコン板のグリップ試験を行った結果、二段階突起物のグリップ力は一段階突起物より約2倍大きくなった。これらのグリップ試験の結果、有限要素法と粒子法のシミュレーション結果、突起物創成ソフトウェアを組み合わせ、任意の形状・変形特性をもつ軟滑物体を確実にグリップするのに最適な二段階突起物を選択できる「グリップ・ソフトウェア」の枠組みを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、軟滑物体を確実にグリップするには、二段階突起物の利用が有効であることが明らかになった。また、一部未完成部分が残っているが、当初目的とした「グリップ・ソフトウェア」の大枠を開発することができた。このグリップ・ソフトウェアは、多種多様な食品、布・プラスチック・ゴム・繊維物質などの工業素材、人体組織(内臓、血管)、土・雪など、任意の形状・寸法・変形特性をもつ軟滑物体を確実にグリップ・搬送することが必要な機械、ロボット、医療器具、スポーツ・作業用具などの表面設計に広く利用できる。

研究成果の概要(英文)：Double-scale protrusions were fabricated to increase gripping ability for soft and slippery objects: One is millimeter-sized triangular prism or quadrangular pyramid protrusions on a stainless steel produced by electrical discharge machining, and another is micronmeter-sized cone-shaped protrusions formed by sputter etching. The friction tests of a soft silicone sheet proved that the double-scale protrusions have about twice higher gripping ability than single-scale protrusions in an oil environment. A framework of grip software for selecting the best protrusions to firmly grip soft and slippery objects was developed based on the results of grip experiments, finite element method and moving particle simulations.

研究分野：機械工学

キーワード：二段階突起物 軟質物体 グリップ機能 ステンレス鋼 放電加工 スパッタエッチング 粒子法シミュレーション グリップ・ソフトウェア

1. 研究開始当初の背景

近年、表面の微細構造(テクスチャ)を用いて、従来の方法では実現できなかった摩擦・潤滑、グリップ・ブレイキ・搬送、接合・微細加工などの機械的機能を得ようとする機運が高まっている。その中で、軟質で滑りやすい定形・不定形物体(軟滑物体、軟滑材と呼ぶ)のグリップ・搬送作業を例にとると、工業製品から日用品に至るまで、軟滑物体の種類(変形特性、表面状態、形状・寸法など)はさまざまであり、それらをグリップする機械・器具の種類や軟滑物体表面と接触する状態も多岐にわたる。たとえば、外科手術では、ピンセット、クリップ、鉗子を用いて、内臓や血管などの軟滑物体や表面層を、把持する、押さえる、除去する、などの処置を行う。顕微鏡下で血管や組織を縫合する場合には、細い針や縫合糸(たとえば直径50 μ m)を確実に把持できるようなピンセット先端の表面パターンが必要となる。寸法が大きな軟滑材を扱う生産工場においても、機械やロボットのグリップ部表面に、滑り防止に有効な何らかのパターンを付与しておく必要がある。

現状では、機械・器具のグリップ部の表面パターンは、目的に応じて個別に、また試行錯誤により決定されていて、学術的に統一されているわけではない。したがって、寸法・形状・変形特性の異なる軟滑材の滑りを防止しグリップ性能を向上させるためには、いかにして従来にはなかった表面パターンを設計・製造するか、複雑なグリップ挙動をいかにして学術的に一般化し、実験に適合するようなシミュレーションを行うか、表面パターンの設計・選択を効率化するために、どのようなソフトウェアを開発するか、が問われている。これまでも、摩擦特性をコントロールするための表面テクスチャの設計・シミュレーションが行われていたが、本研究のように、軟滑材を対象とし、ミリ・ミクロンサイズの二段階突起物を利用してグリップ性能向上を目指すシミュレーションは行われていなかった。

2. 研究の目的

(1) 機械加工により作製したミリメートルサイズの突起物の上に、スパッタエッチングによりミクロンメートルサイズの突起物を形成し、この二段階突起物が軟滑物体を確実にグリップできる条件を実験により見出す。

(2) 液体中の繊維製品、表面に油脂を含む食品(魚肉類)、生体材料(内臓、血管、縫合糸)などの軟滑物体を、確実にグリップ・クランプ・搬送する突起物形状を決めるためのシミュレーション手法を開発する。

(3) 軟滑物体および表面液体層の変形・グリップ特性を有限要素法および粒子法によりシミュレーションし、グリップ試験の結果と比較し、任意の形状・変形特性をもつ軟滑物体を、所定の力で確実にグリップするには、どのような形状の突起物をもつ表面を設計すればよいかを選択できるソフトウェア(以下、グリップ・ソフトウェアと呼ぶ)を開発する。

3. 研究の方法

図1に示すような手順により研究を進めた。

(1) グリップ試験：耐食性があり生体用材料としても用いられているステンレス鋼に、一次突起物として、放電加工を用いて、ピッチがミリメートル長さの三角波状の溝あるいは突起物を付ける。つぎに、高周波マグネトロンスパッタ装置を用いて、アルゴンイオンによるスパッタエッチングを行い、さまざまな形状・寸法・分布をもつ二次微細突起物を形成させる。この二段階突起物試料を種々の軟質高分子板(表面に油を塗布)に押し付けて板の表面に平行な力を加え、グリップ力(静摩擦力)を測定する。

(2) シミュレーション：CADシステム・応力解析ソフトウェアと組み合わせた粒子法ソフトウェアにより、二段階突起物モデルおよび油膜・軟滑材モデルを作成し、両者を接触させて軟滑物体に力を加えてグリップ力を計算する。実験結果とシミュレーション結果を比較してモデルとプログラミングを改良する。

(3) グリップ・ソフトウェアの開発：上記の結果をもとに、任意の形状・任意の変形特性をもつ軟滑物体の損傷(永久変形)を極力避けながら確実にグリップするには、どのような形状の突起物表面を設計すればよいかを選択できるような汎用ソフトウェアを開発する。

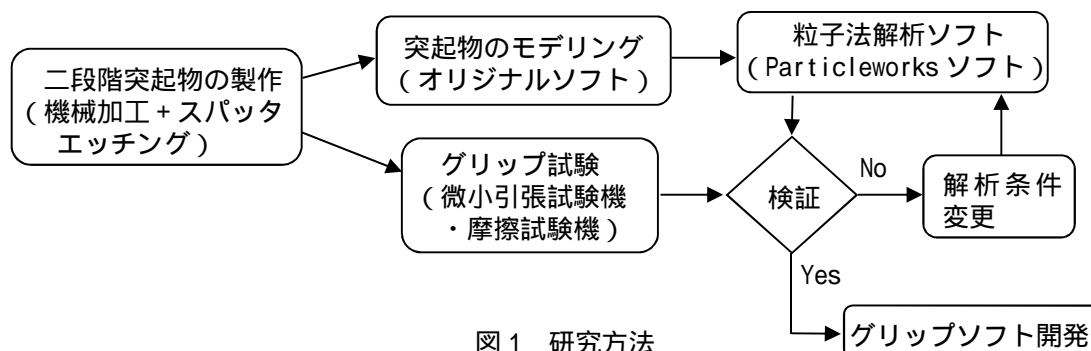


図1 研究方法

4. 研究成果

(1) 二段階突起物の製作およびグリップ試験結果

実験に用いた材料は、市販の直径 20mm のマルテンサイト系ステンレス鋼 (SUS420J2) で、その化学成分は、C:0.35, Si:0.50, Mn:0.41, P:0.027, S:0.02, Ni:0.34, Cr:12.21, Fe:Bal. である。この丸棒をコンピュータ数値制御 (CNC) ワイヤ放電加工機 (Fanuc Co.: Robocut - 0iB) を用いて厚さ 7mm に切断し円板試験片を作製した。エメリーペーパー #1600 まで研磨した平坦表面 (タイプ A₁)、放電加工により作製した三角プリズム型突起物 (タイプ B₁) および四角錐型突起物 (タイプ C₁) をもつ試験片と突起物試験片の寸法を、それぞれ図 2(a), (b), (c) および (d) に示す。これらの試験片をエタノール中で超音波洗浄した後、高周波マグネトロンスパッタ装置 ((株) サンパック製: SP300-M) 内にある水冷カソード銅電極 (直径 100mm) 上の SUS304 ステンレス鋼円板 (厚さ 3mm) の上に載せた。真空槽内の真空度を約 6×10^{-3} Pa にしたのち、アルゴンガス (純度 99.999%) を導入して 0.67 Pa に保持し、高周波電源出力を 250W として、7.2ks スパッタエッチングを行った。これにより、図 2(e), (f) に示すような頂角が約 40°, 最大底面直径が約 20 μ m の円錐状微細突起物を形成した。タイプ B₁ および C₁ の一段階突起物試験片の上に微細突起物を形成した二段階突起物試験片を、それぞれタイプ B₂ および C₂ と表記する。

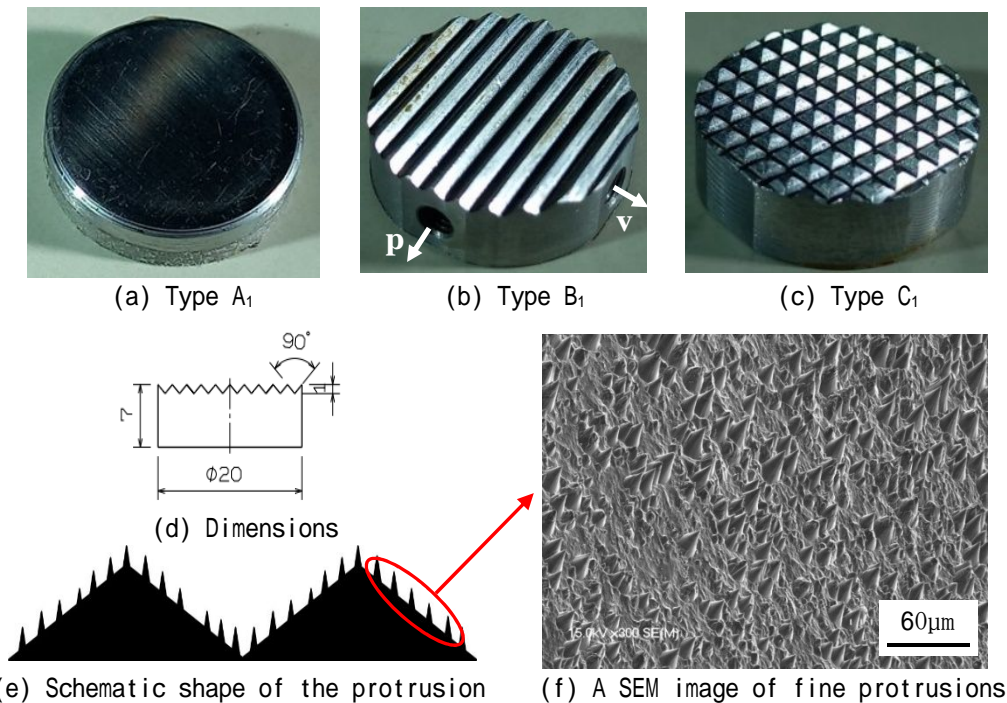


図 2 製作した試験片

グリップ力を測定するために用いた摩擦試験装置を図 3 (a) に示す。軟滑材料としてデュロメータ硬さ 0.2HD、厚さ 3mm の軟質シリコン板を固定し、その上にマシンオイル (Idemitsu Co.: Daphne Multiway 68C) を塗布したのち突起物試験片を置き、所定の錘を載せて垂直力 W を調整した。突起物試験片をナイロン糸でデジタルフォースゲージ (IMADA ZTA-5N) に結び、このデジタルフォースゲージを卓上小型引張試験機 (SHIMADZU EZ-Test) により 20mm/min の速度で引張って、摩擦力 F を測定した。

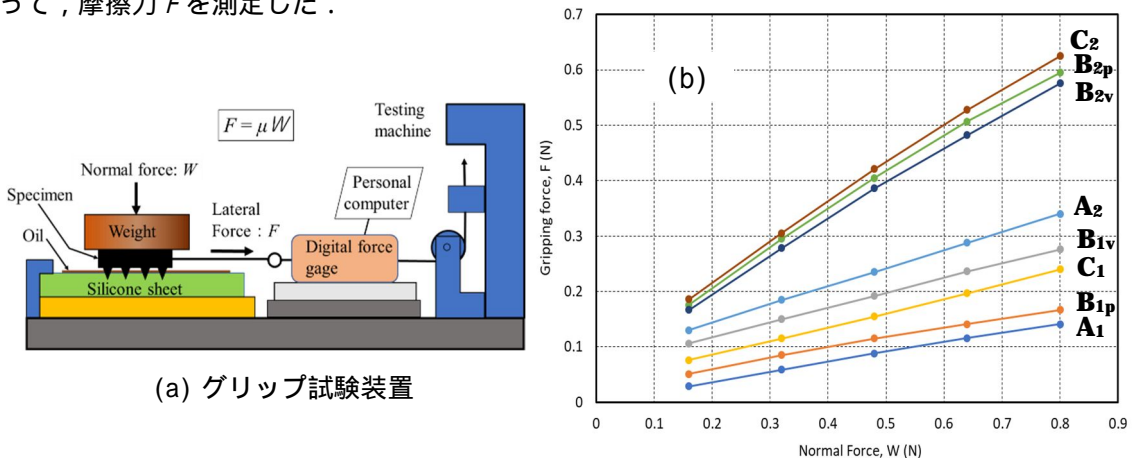


図 3 グリップ試験装置 (a) と計測したグリップ力と垂直力の関係 (b)

測定した垂直力 W とグリップ力 F の関係を図 3 (b) に示す。この図で、 B_{1v} 、 B_{1p} および B_{2v} 、 B_{2p} は、スパッタエッチング前後の三角プリズム型突起物試験片 (図 2 (b)) を、それぞれ p 方向 (プリズムの並びに平行方向) および v 方向 (プリズムの並びに対して垂直方向) に引張ったことを表わす。この図によると、以下のことが分かる。(1) すべての試験片で摩擦力 F は垂直力 W の増加とともに増加する。その程度は二段階突起物試験片の方が大きい。(2) 一段階突起物試験片同士のグリップ力の差は大きく、 B_{1v} 試験片のグリップ力は、 A_1 試験片、 B_{1p} 試験片および四角錐型の C_1 試験片のそれらよりも大きい。 B_{1v} 試験片のグリップ力が C_1 試験片のそれよりも大きい理由は、シリコン板との接触面積が大きく、シリコンの変形抵抗 (突起物の掘り起こし効果) が大きくなるためと思われる。(3) スパッタエッチングした平坦試験片 (A_2) は、スパッタエッチング前の試験片 (A_1) よりもグリップ力が大きく、プリズム型突起物試験片 (B_{1v} 、 B_{1p}) および四角錐型突起物試験片 (C_1) よりもグリップ力が大きい。つまり、先端の鋭い微細突起物がシリコンに埋まり込むため、微細突起物だけでも大きなグリップ力が発生する。(4) いずれの垂直力 W でも、一段階突起物試験片 (B_{1v} 、 B_{1p} 、 C_1) よりも二段階突起物試験片 (B_{2v} 、 B_{2p} 、 C_2) の方が、グリップ力が大きい。これは、一段階突起物のグリップ効果に、二次的な微細突起物のグリップ効果が上積みされていることを意味している。(5) 二段階突起物試験片 (B_{2v} 、 B_{2p} 、 C_2) の間のグリップ力の差は小さい。これは、ランダムに分布する多数の微細突起物が、一段階突起物の方向性に無関係にグリップ力を高めているためと考えられる。

(2) シミュレーション

3次元CADソフトウェアCATIA V5を用いて、微細突起物とシリコン板の有限要素法 (FEM) 応力解析を行った。スパッタエッチング試験片表面の微細突起物の数は膨大で分布もランダムである。そこで、突起物とシリコン板が接触する微小領域 (長さ 0.66mm×幅 0.21mm×高さ 0.12mm) を代表領域とし、この直方体に、それぞれ 3 行×10 列の微細な円錐状突起物 (底面直径 0.03mm) および穴を均一に分布させた FEM モデルを作成した。メッシュの最大サイズは 2×10^{-3} mm、形状精度は 1.2×10^{-4} mm である。また、シリコン板モデルの底面を固定し、突起物試験片モデルの右側面に一様な引張り応力 4000N/m^2 を与え、材料特性値の設定を行って FEM 計算を行った。図 4 (a) に、突起物およびシリコン板の中央断面における Von Mises 応力の分布を示す。全突起物はシリコンから圧縮応力を受け、特に先端の応力が大きい。また、前部にある突起物の応力は後部のそれらより大きい。シリコン側では突起物先端に接する箇所に応力集中が生じるが、弾性係数が小さいため突起物から少し離れると応力が急速に小さくなる。図 4 (b) は、粒子法シミュレーション (MPS) ソフトウェア Particleworks を用いて突起物周辺の油圧分布をシミュレーションした例である。

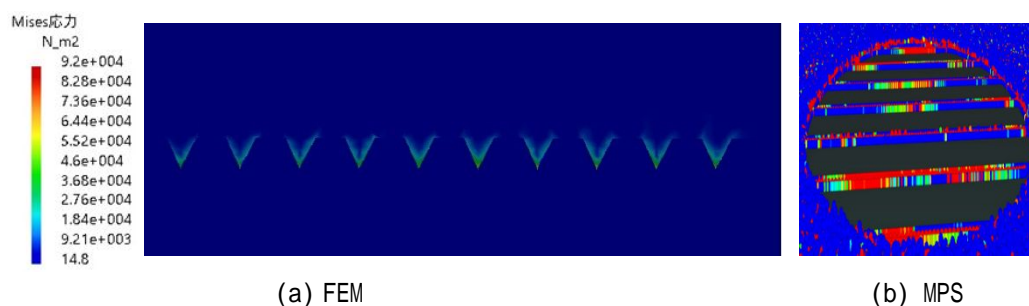


図 4 シミュレーション結果

ところで、グリップ・ソフトウェアを開発する際、実際に測定したグリップ力とモデル化した突起物の形状・寸法・分布を対応させる必要があるが、突起物モデルの作成に汎用の 3D-CAD や CG ソフトウェアを使うと、膨大な手間がかかる。そこで本研究では、微細突起物の SEM 画像から直接 3D 突起物モデルを生成することとし、三角測量の原理に基づいて開発された 3D CG ソフト 3D-Modeler を用いた。まず、試験片テーブルの回転角度を 0° 、 90° 、 180° 、 270° に設定し、それからさらに 5° 、 10° 、 15° と回転させ、合計 72 枚の SEM 画像を撮影した。つぎに、これらの 2、3、4、5 枚を組合せ、3D-Modeler を用いて立体形状の抽出を試みた。その結果、いずれの組合せでも各突起物の立体形状そのものを認識させることはできなかったが、回転角度が 5° 異なる 2 枚の SEM 画像を用いるだけで、ほぼすべての頂点座標を抽出することができた。なお、座標の抽出誤差は 5%以下と少なかった。一例として、図 5(a) に回転角度の差が 5° の 2 枚の SEM 画像を示す。これらの画像を 3D-Modeler に読み込ませ、1 枚目をベースとして、それに 2 枚目をリンクしたあと、対応点を認識させて微細突起物の頂点を抽出した結果を図 5(b) に示す。抽出できなかった頂点 (例えば P) は、マウスで 2 枚の画像上の対応点を指定すれば追加抽出できる。また、2 枚の画像に対応線分 (例えば AB) を挿入すると、抽出の精度が向上する。抽出した 3 次元情報は Excel の CSV 形式のファイルで出力した。

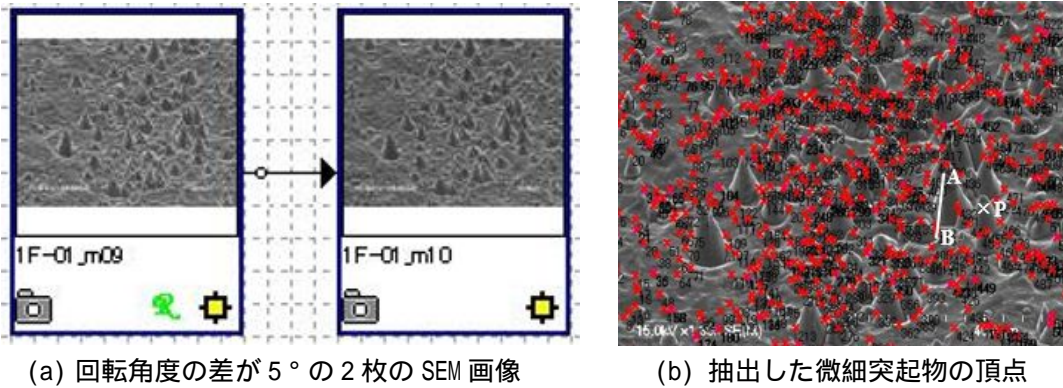


図5 微細突起物のSEM画像から頂点の3次元座標の抽出

つぎに、Excel ファイルの3次元データから突起物群モデルを生成するため、既に本研究者が開発している「突起物モデル創成ソフト」を用いた。これは、Hermite の数式に基づくもので、水平の正方形格子の頂点を持ち上げると曲面パッチが自動的に生成される。持ち上げた頂点での接線ベクトルを短くすれば円錐に近い形状になる。接線ベクトルを長くすれば球に近い形状になる。接線ベクトルを回転すれば非対称形状になる。本研究では、微細突起物の3Dモデルを自動的に生成するために、以下の機能を追加した。(1) Excel のCSV ファイルから突起物頂点の3次元座標を抽出する。(2) 微細突起物の向きと尺度を調整する。

図6に、生成した微細突起物の3Dモデルの一例を示す。比較的大きい突起物のモデルは良く生成されている。小さい突起物のモデルは生成されなかったが、小さい突起物はグリップ力に大きな影響を及ぼさない。生成できる突起物モデルの数はコンピュータメモリ上の制限で最大 10^6 である。これはFEMまたはMPSの解析とシミュレーションには十分である。

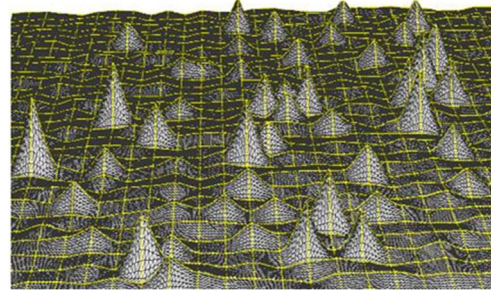
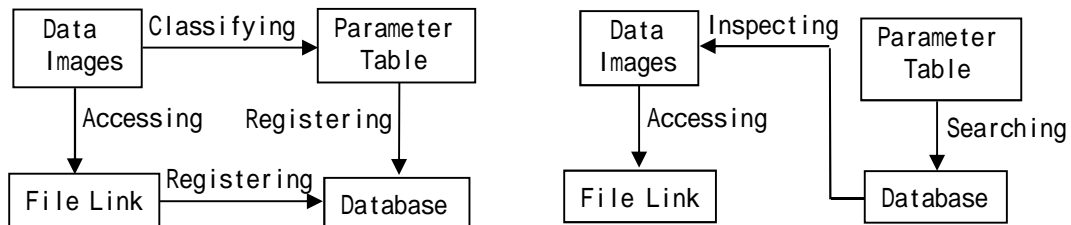


図6 生成した円錐状突起物モデル

(3) グリップ・ソフトウェアの開発

Visual Studio 環境で、C 言語、OpenGL および libjpeg ライブラリを用いて、グリップ・ソフトウェアを開発した。このソフトウェアは図7のように、実験およびシミュレーションのデータと画像の分類・登録機能および検索・閲覧機能から構成される。(a)の分類・登録機能は、本研究者(開発者)の使用するモジュールで、データ(突起物、軟質材料および液体の材料特性値、実験条件、シミュレーションパラメータ、諸ファイル名、キーワードなど)および画像(SEM画像、実験結果グラフ、3D幾何モデル、FEMとMPSのシミュレーション結果など)を分類し、パラメータ表およびファイルリンクを通してデータベースに登録する機能である。一方、(b)の検索・閲覧機能は、ユーザーの使用するモジュールで、パラメータ表に数字とキーワードを入力し、項目の選択をすれば、データベースから関係する突起物の形状およびデータと画像が優先度順に一覧表示されるので、その中から最適な突起物情報を得ることができる。



(a) データと画像の分類・登録

(b) データと画像の検索・閲覧

図7 グリップ・ソフトウェアの構成

なお、現在、大変形有限要素法と粒子法の連成について研究を継続中であり、それが完成すれば、グリップ・ソフトウェアの機能が大きく向上する。本研究で開発したグリップ・ソフトウェアは、国内外で初めてのものであり、今後データベースを充実すれば、グリップ・搬送部品の表面設計に携わる技術者に有用な指針を与えるものと思われる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 高 三徳, 中佐啓治郎, 川島希世子	4. 巻 56
2. 論文標題 スパッタエッチングにより形成した微細突起物のSEM画像を用いた突起物3Dモデルの生成	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 図学研究	6. 最初と最後の頁 11~15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 中佐啓治郎, 高 三徳, 久保 隆, 北御門雄大, 李木経孝	4. 巻 86
2. 論文標題 Ti-6Al-4V合金のアルゴンイオンスパッタエッチングによる微細孔および微細突起物の形成	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本金属学会誌	6. 最初と最後の頁 181~190
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/jinstmet.J2022011	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Sande Gao, Keijiro Nakasa, Kiyoko Kawashima	4. 巻 9
2. 論文標題 Creation of 3D Models from SEM Images of Fine Protrusions Formed by Sputter-Etching of Stainless Steel	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Revista Brasileira de Expressao Grafica, https://rbeg.net/new/index.php/rbeg/article/view/125/232	6. 最初と最後の頁 92~103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Masayoshi Nakamura, Keijiro Nakasa, Yudai Kitamika, Sande Gao, Tsunetaka Sumomogi	4. 巻 22
2. 論文標題 Formation of Fine Protrusions by Sputter Etching of Stainless Steels and Evaluation of Gripping Ability of Fiber Sheets	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Precision Engineering and Manufacturing	6. 最初と最後の頁 689-696
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s12541-021-00495-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Sande Gao, Yuanfeng Wang, Keijiro Nakasa
2. 発表標題 Management of Digital Images in Grip Software
3. 学会等名 The 14th Asia Forum on Graphic and Science (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Sande Gao, Keijiro Nakasa
2. 発表標題 Enhancement of Gripping Ability for Soft Polymer Using Fine Protrusions Formed on Stainless Steels by Sputter Etching
3. 学会等名 JSME International Conference on Materials and Processing 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高 三徳, 中佐啓治郎
2. 発表標題 二段階突起物による軟質で滑りやすい物体のグリップ性能向上
3. 学会等名 日本機械学会機素潤滑設計部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高 三徳, 中佐啓治郎, 川島希世子
2. 発表標題 スパッタエッチングにより形成した微細突起物のSEM画像を用いた突起物3Dモデルの生成
3. 学会等名 2021年度日本図学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Sande Gao, Keijiro Nakasa, Kiyoko Kawashima
2. 発表標題 Creating 3D Models from the SEM Images of Fine Protrusions Formed by Sputter-Etching of Stainless Steel
3. 学会等名 The 13th Asian Forum on Graphics Science (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高 三徳, 中佐啓治郎, 角平 渉, 井上莉駆
2. 発表標題 ステンレス鋼のスパッタエッチングにより形成した微細突起物のグリップ特性の実験的評価とFEM解析
3. 学会等名 日本設計工学会2021年度春季研究発表講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>明星大学教員情報 https://www.iag.meisei-u.ac.jp/meuhp/KgApp?kyoinId=ymieygyssgy&gl=1*w230mt*_ga*MTc4NTMwOTIxMC4xNTg2Mjg4MDEy*_ga_9XN59YCSYK*MTY1MTYzMzg20C4xNi4xLjE2NTE2MzQwMDAuMA..</p>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	中佐 啓治郎 (Nakasa Keijiro) (80034370)	広島国際学院大学・工学部・研究員 (35406)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------