

平成 30 年 5 月 23 日現在

機関番号：32663

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K13905

研究課題名(和文) スリッパ回避のためのMEMS 2次元摩擦係数センサ

研究課題名(英文) MEMS two-dimensional friction coefficient sensors to avoid slipping

研究代表者

松本 潔 (Matsumoto, Kiyoshi)

東洋大学・理工学部・教授

研究者番号：10282675

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、対象の滑りやすさを計測するため、柔らかな弾性体構造を用いた局所滑り生成構造を実現し、圧力と2方向のせん断力を検出する3軸触覚センサと組み合わせて、接触面内の2軸方向の摩擦係数を計測する摩擦係数センサの開発を行った。ナイロンテグスの細毛構造による摩擦係数センサ、弾性体の局所滑りによる摩擦係数センサを開発し、摩擦係数の検出が可能であることを確認した。非線形な感度特性を持つ検出構造として、ローレンツ力により剛性可変のカンチレバー検出構造を評価した。さらにアプリケーションとして、摩擦係数を検出できるロボット用の足構造や、路面との摩擦係数やスリッパを検出できるタイヤの研究開発を行った。

研究成果の概要(英文)：In this research, in order to measure slipperiness of objects, a local slip generation mechanism using a soft elastic material was studied. By combining this mechanism with a 3-axial tactile sensor for pressure and shear forces in two directions, friction coefficient sensors that measure the friction coefficient of the contact surface in 2-axial directions were proposed. A friction coefficient sensor with fine structures of nylon tegus and that with an elastic bump were developed, and by these sensors, detection capability of friction coefficient was confirmed. As detection mechanism with nonlinear sensitivity characteristics, a cantilever structure with variable rigidity controlled by Lorentz force was evaluated. For further applications, a foot structure for robots and a tire for cars that can detect friction coefficient and slip with road surface were developed.

研究分野：知能機械システム

キーワード：摩擦係数 圧力センサ せん断力センサ 局所滑り

### 1. 研究開始当初の背景

人は、濡れている床に足を踏み出した瞬間に滑りやすいこと理解し、安定して歩けるような体勢をとる。食事の後片付けで、油で汚れた食器を触った瞬間に落としやすいことを理解し、安定して把持できる持ち方をする。一方、高齢化の加速に伴い、家庭での作業を手助けするロボットの研究が進められている。ロボットが家庭内で作業するためには、人のように自由に歩行し、自由に様々な物体を操作することが必要である。しかし現在のロボットは、遠く人に及ばない。

申請者らが開発してきた3軸触覚センサと局所滑り生成構造を組み合わせることで、局所滑り発生時の垂直荷重と摩擦力から、摩擦係数を算出できる。人のように触った瞬間に滑りやすさを判定する摩擦係数センサが実現すれば、ロボットの自由な歩行や物体操作が可能となる。

### 2. 研究の目的

本研究では、対象の滑りやすさを計測するため、柔らかな弾性体構造を用いた局所滑り生成構造を実現し、圧力と2方向のせん断力を検出する3軸触覚センサと組み合わせて、接触面内の2軸方向の摩擦係数を計測する摩擦係数センサの実現を目指す。

### 3. 研究の方法

本研究では、平成27年度から29年度までの3年間に渡り、対象との接触時に摩擦方向への力を発生させる局所滑り生成構造の探索、幅広いダイナミックレンジの力に対応するための非線形変形構造の探索、摩擦係数を導出するためのセンサ信号のリアルタイム計測処理技術およびアプリケーションの探索についての研究を行った。

### 4. 研究成果

#### (1) ラージモデルによる局所滑りの原理検証

本研究の摩擦係数センサは、センサに垂直な力を加えることのみによって、局所的に滑りを発生させ、物体表面の摩擦係数を算出するものである。そのためにまず、弾性体でできた突起をセンサ表面に押しつける方法を検証した。センサを上から押し付けると、両端の突起はセンサを支え、中央の突起の接地面で滑りが発生する。(図1-1)

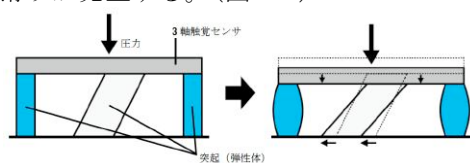


図1-1

中央の傾きをつけた突起によって接地面に垂直方向の力  $F_x$  と水平方向の力  $F_y$  が発生する(図1-2)。センサが押し込まれ突起の角度が小さくなると水平方向の力  $F_y$  は大きくな

る。この力が接地面の最大静止摩擦力  $F_y'$  と等しくなると、 $F_y' / F_x$  から静止摩擦係数が算出できる。

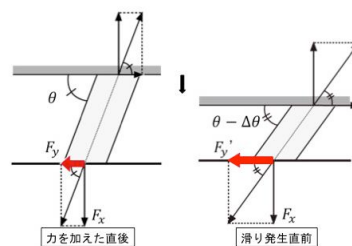


図1-2

センサの検出構造を図1-3に示す。リン青銅の薄板に、ストレインゲージを貼付したカンチレバーを、シリコンゴムに封止したものである。3本のカンチレバーを直交する方向に設置し、xyz方向の力を分解して検出することができる。カンチレバーは4[mm]x10[mm]、ストレインゲージは共和電業製KFG-02-120-C1-16でグリッド長0.2[mm]のものである。ゲージはカンチレバー下端から約4mmの位置に設置した。

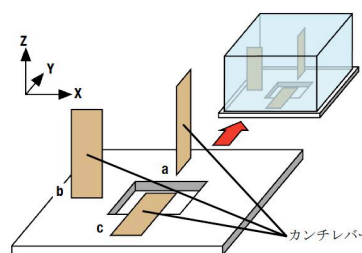


図1-3

センサの構造を図1-4に示す。中央に圧力用突起、周囲4カ所にせん断力用突起を配置した。3Dプリンタで型を作り、型を設置したアクリル板にPDMSを流し込んで固化させた。

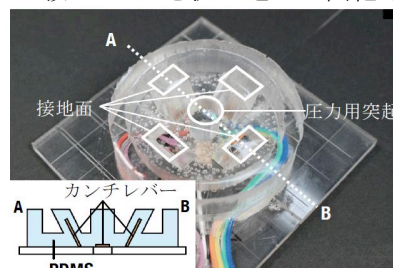


図1-4

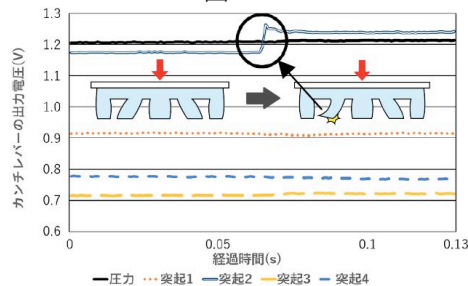


図1-5

センサを上から加圧して行き、局所滑りを発生させた。図1-5では、斜め突起2に滑りが発生している。このときの圧力とせん断力から、摩擦係数の算出が可能である。滑り発

生後に圧力の上昇がみられた。これは滑りにより、斜め突起 2 で受けていた圧力も解放されたためである。

### (2) 細毛構造による摩擦係数センサ

細い毛構造を用いて突起とし、突起を放射状に配置した摩擦係数センサを考案した。突起を放射状に配置することで、滑りが発生するまで突起同士で水平方向の力がつり合い、ラージモデルのような外側の壁がなくとも、安定な計測を行うことができる。

センサの構造を図 2-1 に示す。検出部には、MEMS 技術による 3 軸触覚センサを用いた。その上にナイロンテグスによる斜め突起を、4 方向に放射状に配置した。突起の長さは適度な弾性になる 9[mm] に加工し、先端をライターで軽く炙ることで滑らかな形状にした。突起を放射状に並べ、根元を 2 液混合接着剤のアラルダイトで固定した。

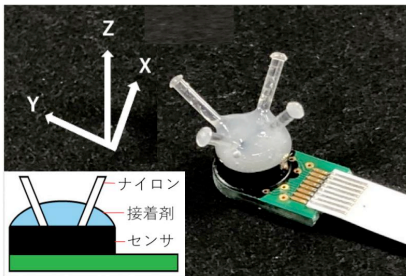


図 2-1

センサを上から加圧して行き、局所滑りを発生させた。図 2-2 に示すように、滑りが発生している。特に、一度滑りが発生すると、x 軸、y 軸両方向で滑りが発生する。このときの圧力とせん断力から、それぞれの方向の摩擦係数の算出を行った。10 回の計測の結果、摩擦係数の平均値と標準偏差は、x 方向が  $0.26 \pm 0.06$ 、y 方向が  $0.35 \pm 0.15$  ととなった。アクリル板の摩擦係数の理論値は 0.38 であり、近い値が得られている。

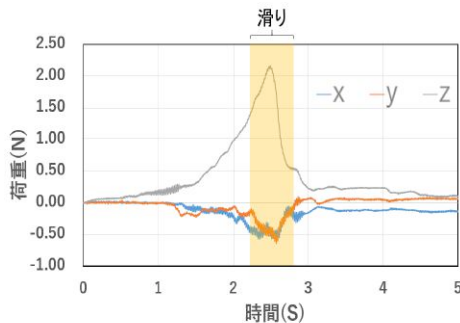


図 2-2

### (3) 弾性体局所滑りによる摩擦係数センサ

弾性体の局所滑りを検出する、摩擦係数センサを考案した。弾性体を対象に押しつけて行くと、接触部の周囲から滑りが発生する。この滑りによるせん断力の差から、摩擦係数を算出する方式である。

センサの測定原理を図 3-1 に示す。(a)は局所滑りのメカニズムを示す。弾性体が対象表面に垂直に押し付けられると、接触領域には垂直応力およびせん断応力が生じる。せん断応力は接触面の中央から周囲に行くにつれ大きくなり、垂直応力との比が静摩擦係数を上回る場合、局所的な滑り領域を形成する。(b)に示すように、中央に垂直応力検出部、両側の滑り領域にせん断力検出部を設けておく。(c)に示すように、静摩擦係数が大きい場合は滑り面積が小さく、静摩擦係数が小さい場合には滑り面積が大きくなる。この違いは、両側の剪断応力検出部の信号の差として、検出できる。

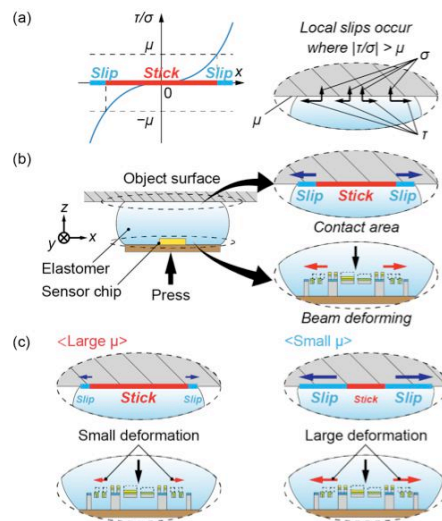


図 3-1

図 3-2 に、センサの構造を示す。弾性体とそこに埋め込まれたセンサチップとから構成される。センサチップは、ピエゾ抵抗部を備えた 3 対の梁からなる。中央の梁対はピエゾ抵抗が表面ドーピングされているため垂直方向の変形を検出し、他の 2 対の梁はピエゾ抵抗が側壁にドーピングされているため横方向の変形を検出する。これらの梁により、弾性体の中央部の垂直応力と、左右の剪断応力が検出できることになる。

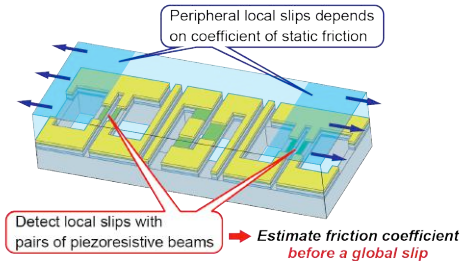


図 3-2

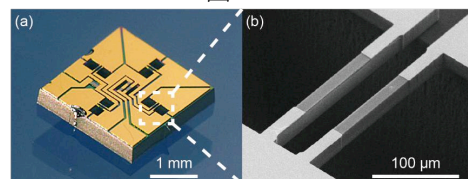


図 3-3

製作したセンサの検出部の写真を図 3-3 に

示す。中央にある垂直応力検出部の周囲に、直交する方向に4つのせん断力検出部が配置されている。

図3-4に、摩擦係数計測実験の結果を示す。 $\Delta R2/R2$ は中央の垂直応力検出部の出力、 $\Delta R1/R1$ と $\Delta R3/R3$ は両側の剪断応力検出部の出力である。(a)は、摩擦係数 $\mu$ が0.2、0.4、0.8、1.1のときの、 $\Delta R2/R2$ と $\Delta R1/R1 - \Delta R3/R3$ との関係を示している。両者の関係は、きれいな直線に載っており、また摩擦係数 $\mu$ に応じて傾き $\alpha$ が変わっている。摩擦係数 $\mu$ が小さくなると傾きが大きくなる。(b)は14回計測を行ったときの摩擦係数と傾きの関係である。両者には相関があり、傾き $\alpha$ から摩擦係数 $\mu$ を推定することができる。

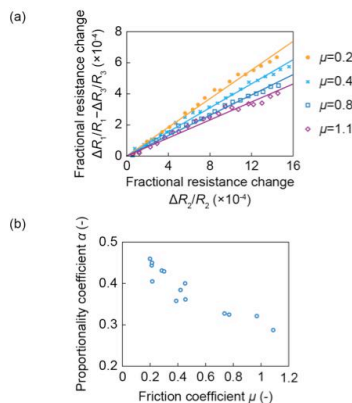


図 3-4

#### (4) 非線形な感度特性を持つ検出構造

幅広いダイナミックレンジの力に対応するための非線形変形構造の探索に関して、非線形な感度特性を持つ、カンチレバー型検出構造を検討した。

剛性を変化させることの出来るカンチレバー構造を図4-1に示す。従来型のピエゾ抵抗カンチレバー構造に、電流を流すことのできる電路を付加する。外部から磁場を印加して電路に電流を流すと、ローレンツ力による力が発生し、図の右水平方向に力が発生する。この力はカンチレバーの復元力として働き、カンチレバーの剛性が変化することになる。

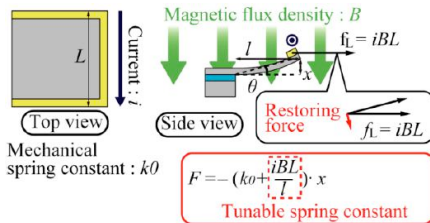


図 4-1

試作したカンチレバーの構造を図4-2に示す。カンチレバーのサイズは  $300 \times 230 \times 0.2$  [ $\mu\text{m}$ ]であり、カンチレバーの周囲に金による電路が形成されている。ばね定数は  $11.1$  [ $\text{mN/m}$ ]、固有振動数は  $2.9$  [ $\text{kHz}$ ]となるよう設計した。

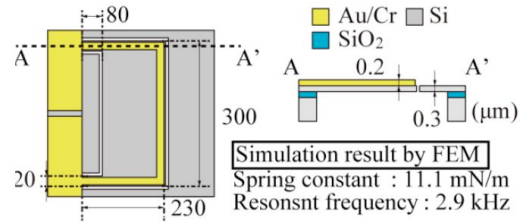


図 4-2

剛性の変化を、共振周波数の変化で計測した。10~4000[Hz]の音波によりカンチレバーを加振し、振動の大きさをレーザドップラで測定した。印加した磁場は  $500$  [ $\text{mT}$ ]、電流は  $-20 \sim 30$  [ $\text{mA}$ ]である。

実験の結果を図4-3に示す。磁場が加わっていない場合、電流を流しても共振周波数のシフトはなかった。それに対して電流を流した場合、共振周波数のシフトが観測された。電流がプラスの場合は、剛性が上がり共振周波数は高くなる。電流がマイナスの場合は、ローレンツ力は図4-1の左方に働いたため、剛性が下がり共振周波数は低くなる。

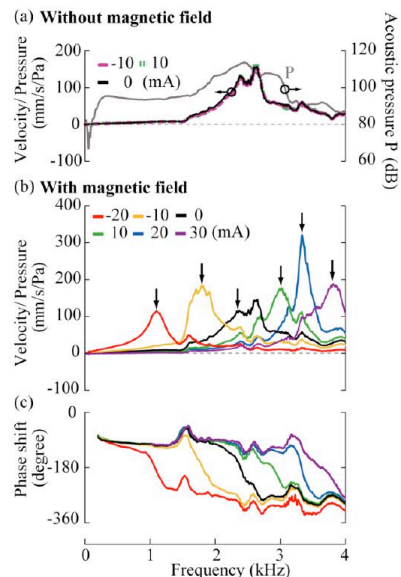


図 4-3

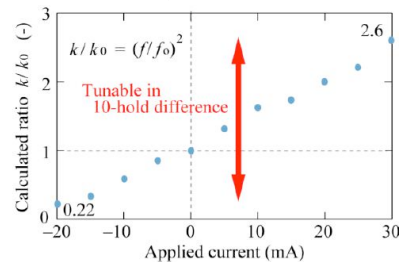


図 4-4

図4-4は、共振周波数の変化を剛性の変化に換算したものである。実験により、バネ剛性を10倍の範囲で変化させることが可能であることが確認できた。これにより、感度を電流により変化させることのできるセンサの実現につなげることができる。

#### (5) 摩擦係数を検出できるロボット用足構造 評価実験およびアプリケーションの探索と

して、踏み込んだ時に前足部が微小滑りを起こすことを利用した、ロボット用の摩擦係数検出足機構を開発した。

摩擦力の測定原理を図 5-1 に示す。図のような配置の部材 A と部材 B がバネで連結されている。部材 A に力を加えると部材 A は下方に移動する。しかし部材 B は、せん断力が最大静止摩擦力を超えない限り、動き出さない。さらに部材 A を下方に移動させると、バネの角度が変わり、やがて滑りを生じる。この時の押しつけ力と摩擦力の比が、静止摩擦係数である。

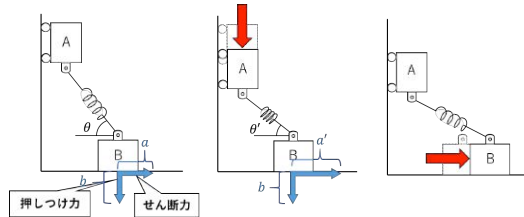


図 5-1

試作した足機構の写真を図 5-2 に示す。人間の足のアーチ機構をもとにした形状になっており、かかと部と指の付け根部の間に 3 軸力センサを備えた滑り機構を設けてある。足の機構のほとんどは、3D プリンタで形成した。指の付け根部とかかと部をつなぐシリンダー機構は、滑り製を確保するため、アルミパイプとアルミ棒をそれぞれ加工して作成した。

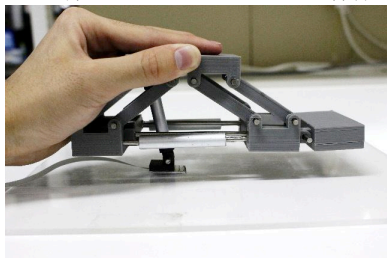


図 5-2

踏み込んだときの路面摩擦係数の計測実験を行った。3 軸力センサで計測した値を図 5-3 に示す。z 軸が押しつけ力、y 軸がせん断力である。踏み込んでいくにつれせん断力が増加し(赤いハッチング)、最大静止摩擦力を超えたときに滑りを生じる(青いハッチング)。このときの押しつけ力とせん断力の比から、静止摩擦係数が算出できる。

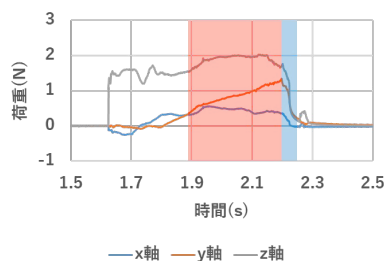


図 5-3

アクリル板とアルミ板の 2 種類の路面でそれぞれ 10 回ずつ計測を行った。得られた摩擦係数の実験値は、アクリル板が  $0.39 \pm 0.07$ 、

アルミ板が  $0.71 \pm 0.09$  となった。摩擦係数の理論値はアクリル板が 0.38、アルミ板が 0.82 なので、かなり良い値が得られていると考えられる。

#### (6) 摩擦係数検出タイヤ

タイヤの表面に摩擦係数検出機構を組み込み、路面の摩擦係数を検出できるタイヤを検討した。1/8 スケールのラジコンモデルのタイヤに 3 軸力検出機構を組み込み、走行時のタイヤ表面の圧力、せん断力を検出し、ワイヤレスで伝送する。スリップ発生の検出、およびその時の圧力とせん断力の比から、摩擦係数の導出が可能であることを確認した。

図 6-1 に、タイヤの構造を示す。ホイールとタイヤゴムの間に、薄いスポンジをベースにして 3 軸触覚センサを配置する。タイヤの周囲に、90° 毎 4 カ所にセンサを配置した。さらにホイールにセンサアンプ、ワイヤレスボードを組み込み、タイヤ回転時の計測ができるようにした。ラジコンモデルの外観を図 6-2 に示す。

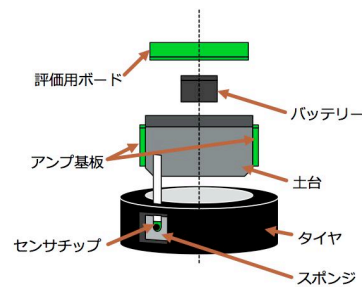


図 6-1

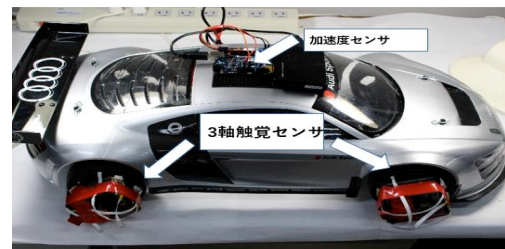


図 6-2

スリップの検出、路面の摩擦係数の計測の原理を図 6-3 で説明する。自動車を走らせておき、ブレーキを次第に深くかけてゆく。すると路面との間の摩擦力は次第に大きくなり、やがて最大静止摩擦力に達し、タイヤがロックしスリップが発生する。

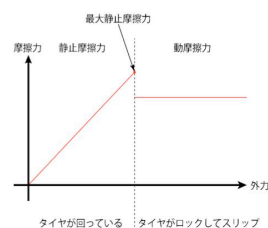


図 6-3

図 6-4 にスリップを検出したときの力の様子を示す。タイヤにかかるせん断力が最大値

をとった後、タイヤがロックしスリップが発生、せん断力が減少していることがわかる。

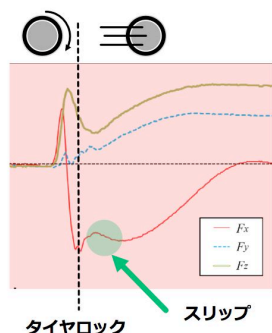


図 6-4

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

①Kiyoshi Matsumoto, and Isao Shimoyama, "MEMS sensor devices with a piezo-resistive cantilever," International Journal of Automation Technology, , 査読有り, vol.12, No. 1, pp. 4-14, 2018, DOI: 10.20965/ijat.2018.p0004

②Taiyu Okatani, Hidetoshi Takahashi, Kentaro Noda, Tomoyuki Takahata, Kiyoshi Matsumoto, Isao Shimoyama, "A Tactile Sensor Using Piezoresistive Beams for Detection of the Coefficient of Static Friction," Sensors, 査読有り, vol. 16, no. 5, 2016, DOI:10.3390/s16050718

③Hidetoshi Takahashi, Yun Jung Heo, Nobuchika Arakawa, Tetsuo Kan, Kiyoshi Matsumoto, Ryuji Kawano, Isao Shimoyama, "Scalable fabrication of microneedle arrays by spatially controlled UV exposure," Microsystems & Nanoengineering, 査読有り, vol.2, 2016, DOI:10.1038

④Nguyen Thanh-Vinh, Omiya Tomoki, Tsukagoshi Takuya, Hirayama Kayoko, Noda Kentaro, Matsumoto Kiyoshi, Shimoyama Isao, "High-sensitivity micro electro mechanical systems-based tri-axis force sensor for monitoring cellular traction force," Micro & Nano Letters, 査読有り, vol. 11, no. 10, pp. 563-567, 2016, DOI:10.1049/mnl.2016.0246

[学会発表] (計 6 件)

①高橋英俊, 風間涼平, グェンタンヴィン, 高畑智之, 松本潔, 下山勲, "マイクロピラーアレイを用いた高感度 MEMS 気流せん断応力センサ," 第 33 回センサ・マイクロマシンと応用システムシンポジウム, 2016 年 12 月 23-26 日, 平戸文化センター (長崎県平戸市)

②Taiyu Okatani, Hidetoshi Takahashi, Kentaro Noda, Tomoyuki Takahata, Kiyoshi Matsumoto and Isao Shimoyama, "A TACTILE SENSOR FOR SIMULTANEOUS MEASUREMENT OF

APPLIED FORCES AND FRICTION COEFFICIENT," The 29th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS '16), Jan.24-28, 2016, Shanghai (People's Republic of China)

③W. Ohnishi, H. Takahashi, T. Takahata, K. Matsumoto, and I. Shimoyama, "CANTILEVER WITH 10-FOLD TUNABLE SPRING CONSTANT USING LORENTZ FORCE," The 29th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS '16), Jan.24-28, 2016, Shanghai (People's Republic of China)

④Nguyen Thanh-Vinh, Kiyoshi Matsumoto, and Isao Shimoyama, "PRESSURE DISTRIBUTION ON THE CONTACT AREA DURING THE IMPACT OF A DROPLET ON A TEXTURED SURFACE," The 29th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS '16), Jan.24-28, 2016, Shanghai (People's Republic of China)

⑤Nguyen Thanh-Vinh, Hidetoshi Takahashi, Takuya Tsukagoshi, Kiyoshi Matsumoto and Isao Shimoyama, "THE SOUND OF A SLIDING DROPLET," The 29th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS '16), Jan.24-28, 2016, Shanghai (People's Republic of China)

⑥Nobuhiko Matsuda, Nguyen Minh Dung, Tomoyuki Takahata, Kiyoshi Matsumoto, Isao Shimoyama, "CFRP MONITORING METHOD WITH PIEZORESISTIVE BEAMS," The 29th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS '16), Jan.24-28, 2016, Shanghai (People's Republic of China)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 摩擦係数測定装置、摩擦係数測定システム及び歩行ロボット

発明者: 下山勲, 松本潔, 野田堅太郎, 岡谷泰

権利者: 国立大学法人東京大学

種類: 特許

番号: 特願 2016-97362

出願年月日: 2016 年 5 月 13 日

国内外の別: 国内

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

<http://www.leopard.t.u-tokyo.ac.jp/>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

松本 潔 (MATSUMOTO, Kiyoshi)

東洋大学・理工学部・教授

研究者番号: 1 0 2 8 2 6 7 5