

スマートブラシシステムの開発に初めて成功

～匠の技術伝承に向けた繊細な動きのデジタル化へ大きく前進～

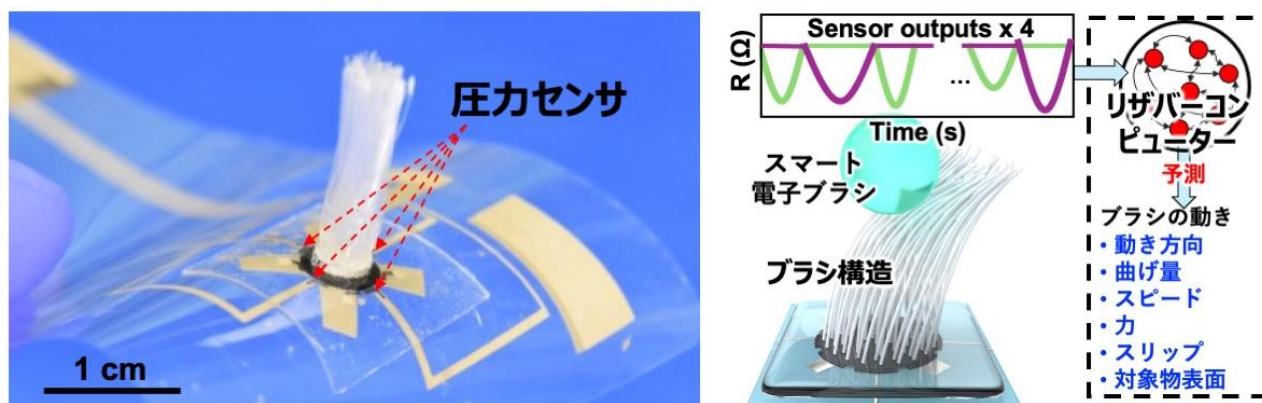
ポイント

- ・ ブラシの動き、速度、力、滑りを検知可能なスマートブラシシステムを実現。
- ・ 対象物の表面状態を検知可能。
- ・ 匠の技術伝承やロボットへの適用などデジタル化へ期待大。

概要

北海道大学大学院情報科学研究院の竹井邦晴教授、東京大学大学院情報理工学系研究科の中嶋浩平准教授、大阪公立大学大学院工学研究科の本田智子研究員らの研究グループは、ブラシ構造に圧力センサを搭載させ、その出力を機械学習の一種であるリザバーコンピューティングで解析することでブラシの動き、速度、力、滑り、そして対象物の表面状態を同時検出するスマートブラシシステムを初めて開発しました。そして本スマートブラシシステムを用いて、数字の執筆をデータ化できることを実証しました。特にブラシが対象物表面を「滑る」情報を初めて検出することにより実現できたものです。また、このブラシの様々な動き情報に加え、対象物表面の状態を検知することができ、匠が表面状態に応じて変化させるわずかなブラシの動きなどもデータ化できる可能性を示すことができました。今後、本センサシステムをさらに発展させることでブラシや研磨などの匠の技術をデータ化することができ、それをロボットや若手にデータベースで伝承することが期待できるものです。

なお、本研究成果は、日本時間 2025 年 1 月 30 日（木）公開の Science Advances 誌に掲載されました。



開発したスマートブラシシステムの写真とその解析プロセス

【背景】

研磨やブラシ技術、書道、絵画などは芸術であり、繊細且つ感覚が重要とされ、これらは熟練された匠の技術又は才能で実現できるものとされてきました。そのような中で、近年ロボット技術が著しく発展し、人をサポートするロボットなど様々な応用が提案され、実際に私たちの生活に参入してきています。しかし、研磨やブラシ技術などいわゆる匠の技術は、その繊細な動きや感触・感覚が重要であり、それをデータ化することは現状まだできていません。熟練技術を有する匠の高齢化に対する技術の保護・伝承、そして世界的競争が激しくなっているロボット技術において、どのように技術的優位性を示すかが今後重要な要素となることは間違いありません。このような将来的な自動化や次の世代へと確実に技術を伝承するには、その匠の技術をデータ化することが必要不可欠です。そこでこのような繊細な動きと感覚を伝承する技術としてブラシの繊細な動きなどをデータ化するスマートブラシの開発を行いました。

【研究手法】

本研究では下記の項目について研究開発を行いました。

- (1) ブラシの動きを圧力の値で可視化するため、低い圧力レンジを計測可能なフレキシブル圧力センサを集積させたデバイスの開発
- (2) 上記、圧力センサにブラシ構造を搭載させ、ブラシの動きに対応する圧力センサのデータ計測及び解析
- (3) 得られた圧力センサデータを瞬時解析し、ブラシの動き、速度、力、滑り、そして対象物の表面状態を抽出する機械学習アルゴリズムの開発
- (4) データ解析アルゴリズムを実装させ、その解析結果からブラシの軌跡をデータ化するデモンストレーション

【研究成果】

(1) センサ開発

ブラシ構造直下に集積形成する圧力センサの開発を行いました。特にブラシの動きにより生じるブラシ根本箇所の圧力変化を計測できるよう数十 Pa といった比較的低い圧力から数十 kPa の高い圧力までを計測可能なフレキシブル圧力センサ構造を今回新たに提案しました。センサはまずポリイミドフィルムをレーザー照射することで形成するレーザー励起グラフェン (LIG) をポリジメチルシロキサン (PDMS) に転写します。そしてカーボンブラック (CB) を印刷したポリエステルフィルムを LIG/PDMS フィルムに貼り合わせることで抵抗型圧力センサを作製しました (図 1)。作製プロセスの関係上、LIG/PDMS 表面は凹凸且つ導電性を有しているため、印加圧力に応じて CB 電極との接触面積が変化します。すなわち接触抵抗が変化します。この抵抗変化から圧力を算出することが可能となります。圧力を印加した時、また徐々に圧力を解放した際のセンサの抵抗変化率の結果を図 1 右に示します。結果から約 50 Pa から 26 kPa 程度の圧力レンジでセンサが抵抗変化を示すことが分かりました。

(2) スマートブラシセンサ

(1) で開発した機械的に柔軟なフレキシブル圧力センサを 4 個集積形成し、その上にブラシ構造を設置しました (図 2 左)。次に集積した 4 個の圧力センサがブラシの動きに応じて変化するか動作確認を行いました。実験では図 2 左の写真の縦方向 (圧力センサ 1 と圧力センサ 2 の方向) に往復運動する

ようにブラシを動かしました。結果から、ブラシの動きに応じて圧力センサの抵抗値が大きく変化していることが確認できました（図 2 中央）。その時の抵抗変化とブラシの曲がり状態の結果をプロットすると、左右の動きで抵抗値にヒステリシスの特性を有していることが分かりました。通常であればこのヒステリシスはセンサとしては悪い特性として扱われますが、本研究では機械学習の一種であるリザーバーコンピューター（RC）を用いることで、これまで問題視されてきたフレキシブルセンサのヒステリシス特性があっても解析可能となります。

（3）データ解析アルゴリズム

ブラシの動きに応じて圧力センサの出力には非線形性があることが分かったため、この出力結果の詳細を解析し、それをうまく有効利用する RC の解析アルゴリズムの開発を行いました。まずブラシの上にかかる力、ブラシの動きに関しては圧力センサ出力から容易に予測することができました。さらにブラシの動きのメモリ効果をうまく利用することでブラシの動いている速度も予測できました。またこれまでのウィスカー型センサでは計測できなかったブラシの滑りをセンサ出力のわずかな変化から予測可能であることも見出しました。ブラシの往復運動では、応用により異なりますが、ほとんどの場合でブラシは曲がったのちに物体表面を滑る動作を行います。この滑りを初めて検出することができたため、ブラシの動き、特に書道のような筆の動きを可視化し文字をデジタル化することも可能になります。そしてこのようなブラシの動きに加え、ブラシ表面の変化を解析することで、対象物体表面の状態も検知することが可能であることが分かりました。これは匠が対象物の状態をわずかな感覚の変化から感じ、それに応じて研磨の力や速度などを制御させることを、本スマートセンサで実現可能であることを初めて示唆した結果となります。

（4）スマートブラシシステムのデモンストレーション

（3）のように RC 技術を用いることで、必要となるブラシの動きに加え、対象物の表面を計測することが可能になりました。そこでこの解析技術を用いて、ブラシ先端に墨をつけ、数字の 0 から 9 ままでを一筆書きし、その時のブラシの軌跡をデジタル化する実験を行いました。図 3 上に示すような取手をつけたスマートブラシを準備しました。動作中のスマートブラシのデータ及びブラシの軌跡を表示するソフトを作成し実験を行いました（図 3 中央・下）。ブラシを用いた数字の執筆中の動きのほとんどが滑り状態であり、その滑りを他の状態とともに同時に計測することに初めて成功したため、ブラシで執筆した文字をデジタル化することができました（図 4）。今回のデモでは、対象物の表面状態を計測することは行いませんでしたが、このスマートブラシを表面の研磨などに適用することで、表面の状態（研磨する過程での粗い表面から平坦な表面へ変化する過程）を観察しながら、ブラシの状態を計測することが可能になります。

【今後への期待】

本研究ではスマートブラシシステムの基本コンセプトとその実証を行いました。まだこれをロボットに適用したり、匠の繊細な感覚を含む技術をデジタル化することが本当に可能なのはこれから、さらにセンサの精度を上げながら、確認していかなくてはなりません。少子高齢化へと加速している現状、ロボット技術の世界的な競争、そしてデジタル社会の状況を鑑みると、このような技術が早く実装されることが重要であると考えております。研究グループは社会貢献としてこのような技術をさらに発展させていきたいと考えております。しかし大学研究機関のみでは本実現には限界があり、今後、産官学で

の取り組みを一層加速させなくてはなりません。例えば匠の研磨技術をデジタル化し、そのデータを若手へと伝承したり、さらにはロボットへと適用することで自動化へと結びつくような次世代の全く新しいデジタル社会の実現を日本発で目指したいです。これにより快適で便利な社会の構築が期待されます。本実現へ向け、みなさまの協力をお願いできればと思います。

【謝辞】

本研究は JST AIP 加速 JPMJCR21U1、JST ALCA-Next JPMJAN23F1、JSPS 科研費 JP22H00594、JP24H00887、JST AIP 加速課題 JPMJCR21U1、村田学術振興財団、武田科学振興財団の助成を受けたものです。

論文情報

論文名	Flexible electronic brush: real-time multimodal sensing powered by reservoir computing through whisker dynamics (フレキシブル電子ブラシ：ウィスカーダイナミクスをリザーバー解析することで実現する常時、マルチモーダルセンシング)
著者名	中村悠希 ¹ 、本田智子 ² 、松村紅怜 ² 、若林聖史 ³ 、上原 功 ⁴ 、中嶋浩平 ⁴ 、竹井邦晴 ¹ (¹ 北海道大学大学院情報科学研究院、 ² 大阪公立大学大学院工学研究科、 ³ 大阪府立大学大学院工学研究科、 ⁴ 東京大学大学院情報理工学系研究科)
雑誌名	Science Advances
D O I	10.1126/sciadv.ads4388

【参考図】

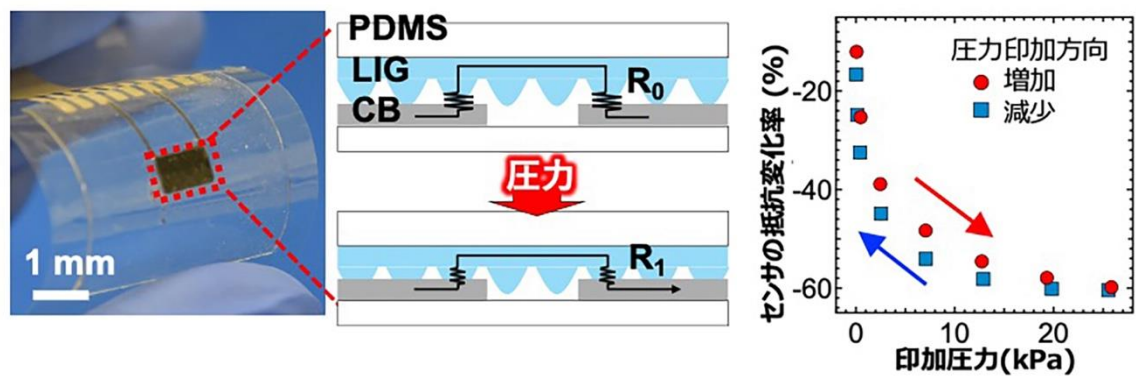


図 1. 開発したフレキシブル圧力センサ

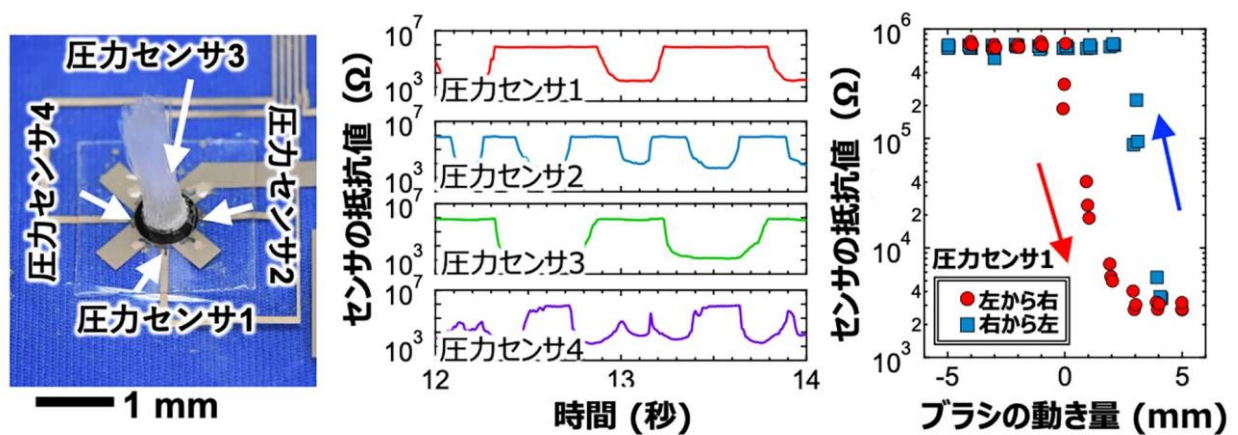


図 2. スマートブラシのセンサ写真とブラシの動きに対するセンサの抵抗値の計測結果

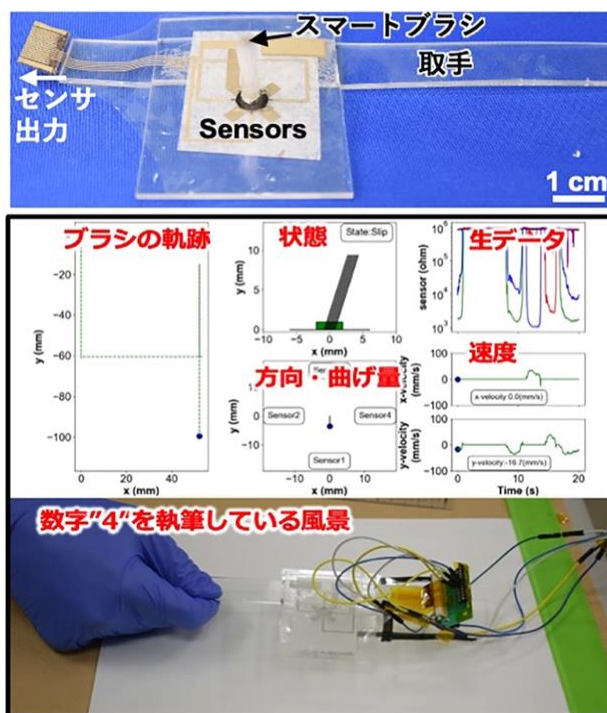


図 3. スマートブラシセンサシステムの写真とそのデモ風景

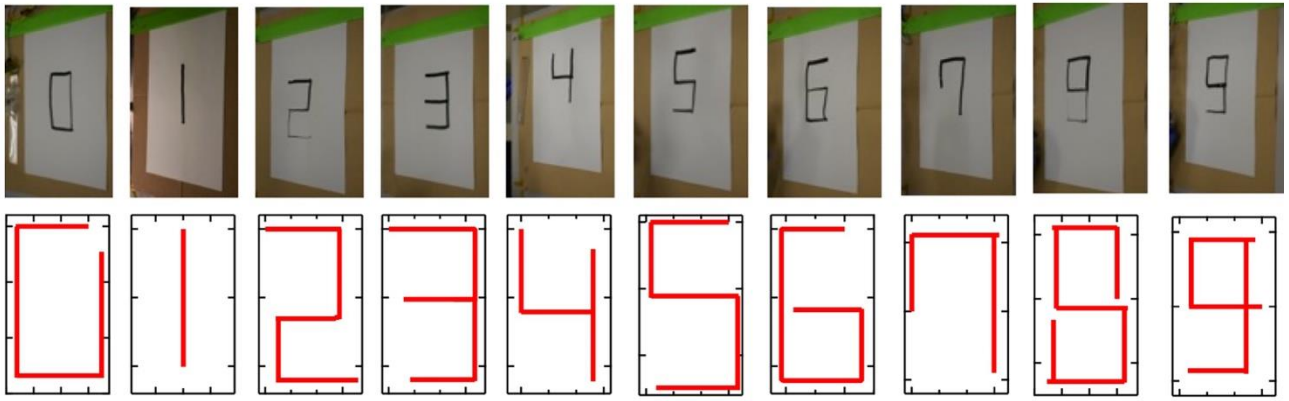


図 4. スマートブラシシステムで実際に書いた数字とデジタル化した数字の結果