

戦略的創造研究推進事業 CREST  
研究領域「素材・デバイス・システム融合による革新的  
ナノエレクトロニクスの創成」  
研究課題「繊細な触覚を定量的に感知する「ナノ触覚  
神経網」の開発と各種の手触り感計測技術への応用」

## 研究終了報告書

研究期間 2015年10月～2021年3月

研究代表者：高尾 英邦  
（香川大学創造工学部  
機械システム工学領域、教授）

## § 1 研究実施の概要

### (1) 実施概要

本プロジェクトでは、今日のエレクトロニクスでは実現されていない「人間の指先が持つ繊細な手触り感」をセンサデバイスとシステム技術で計測し、数量化を可能にするシステムに実現するための基盤技術構築をめざして研究を実施した。人間の主観が含まれる各種の手触り感を数量化する計測システムと新しい触覚センシングの応用分野を創出するためには、人間が指先から得ている触覚時の刺激を正確に取得可能なセンサデバイス技術と手触りの感覚を客観的に数値化・数量化する感覚評価法の間を適切な情報処理システムで結ぶセンシングシステムとして実現することが必要となる。研究を進める上では、チーム内における「ナノ触覚・応用開発」グループが技術開発の中核となる「高性能触覚センサデバイス(ナノ触覚センサ)」を実現するとともに、「触覚試験」グループが開発した標準サンプルを用いてデバイス性能を数量化した。また、「神経網アルゴリズム」グループと「学習最適化」グループは手触り感の数量化を行うために最適なシステムを検討して実現し、「ナノ触覚・応用開発」グループとともに各種応用分野における手触り感計測の実用可能性を開拓した。上記グループに属する各メンバーは、それぞれの専門性に応じてグループの垣根を超えた3つの技術レイヤー(ナノ触覚レイヤー、神経網アルゴリズムレイヤー、応用開発レイヤー)のいずれかに所属し、各レイヤーの成果をシームレスに融合可能な異分野協力体制の下に、目標達成に向けて研究を推進した。

プロジェクト前半期は主に、単一の接触子を有するナノ触覚センサを開発してセンシングの性能を追求するとともに、その高分解能の触覚信号から手触り感の識別・数量化を可能とする「ナノ触覚技術」の基礎を構築した。ナノ触覚技術は、従来の触覚デバイスでは観測不能であった100 $\mu\text{m}$ 以下の微細なテクスチャに起因する「手触り」の情報を取得する新領域の触覚センサと、その信号を低電力かつ効果的に情報処理するプロセッシング技術、さらに、人間が感じる手触り感とその素材毎の違いを見分ける感覚の数値化技術を統合して、手触り感の数量化を実現する触覚センシング技術である。ナノ触覚センサの基本となる測定項目(凹凸の空間解像力と摩擦力の検知能)についての目標を空間解像度100nm、摩擦力50 $\mu\text{N}$ に設定し、先端部半径0.5 $\mu\text{m}$ の鋭い接触子先端を持つ「高空間解像型」と人間の指紋断面形状をモチーフとした先端形状の接触子を持つ「柔軟対象物用」の二種類の触覚センサデバイスを開発した。ナノ触覚センサから得られた信号の波形解析やカオス解析から得られた特徴量をもとに抽出した各種の特徴量を用い、アンケート調査(官能評価試験)で数量化された「ザラザラ感」や「なめらかさ」などの手触り感に回帰分析を実施することで、それらの手触り感に深く関係する特徴量を明らかにするとともに、計測による数量化が可能であることを実証した。さらに、触覚信号に対する深層学習により、10種類の布地を最高99.4%で識別することに成功し、違いが微妙な7種類のティッシュペーパーでも最高80.4%の精度で識別することが可能であった。

プロジェクト後半期においては、指先の指紋と同様に精緻なピッチで接触子を集積したアレイ型ナノ触覚センサ(神経網型ナノ触覚センサ)を開発し、計測対象表面における高解像度の二次元触覚分布画像の取得を可能とした。また、指先が接触面全体から得る情報をもとに様々な触覚を得ている様に、全接触子から得られる信号の相互関係を分析することで、「硬さ分布」や「滑り」を計測する高度な触覚機能を新たに実現した。対象表面の硬さ分布については、およそ100 $\mu\text{m}$ 以下の空間解像度で「硬さ分布」を可視化することに成功した。また、接触子アレイと対象の接触荷重分布の変化から、表面が滑り易い対象であっても「滑り」を正確に検知することが可能となった。これらの新機能は指先にある指紋と受容器の働きを、接触子のアレイ化によって一部再現して成し得たものであり、より精度の高い手触り感数量化に貢献する。

終盤におけるナノ触覚センサは、当初の目標値以上である空間解像度100nm以下、摩擦力検知能20 $\mu\text{N}$ 以下の性能に達し、計測事例として約200nmの厚みの毛髪表面のキューティクル形状と生じる摩擦力変化の関係性を明確に捉えた。終盤におけるもう一つの主要成果は、ナノ触覚レイヤーと神経網アルゴリズムレイヤーの密な協力で構築された「手触り感スキャナー」の実現である。当初は単一接触子型のナノ触覚センサを搭載していたが、最終的にアレイ型ナノ触覚センサを搭載することにより、柔らかい布地や皮膚表面の「微細凹凸形状」「摩擦」と

「硬さ分布」を同時かつ高い空間分解能で可視化することに成功した。手触り感スキャナー装置の開発により、高性能のナノ触覚技術を「いつでも・どこでも・誰にでも」利用できる手段が構築され、応用開発レイヤーの研究をはじめとして、ナノ触覚技術の実用化を加速している。初期に開発した単一接触子型のナノ触覚センサは、2019年11月に実用化企業との間で特許の実施許諾契約締結に至り、本プロジェクト成果の実用化展開が開始されるに至っている。

## (2) 顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

### 1. サブミクロン領域の超高解像度触覚を検知するセンサデバイスの開発

概要:

1 ミクロン以下の領域での超高解像度触覚情報のセンシングを可能とするナノ触覚センサを初めて実現した。前半期には空間解像力 200nm 以下、同時検出摩擦力 180 $\mu$ N の触覚検知性能を実現し、最終的に空間解像度 100nm 以下、摩擦力検知能 20 $\mu$ N 以下の性能を実現した。他に類をみない触覚検知性能により、約 200nm の厚みである毛髪表面のキューティクル形状となぞりによって発生する摩擦力の関係を初めて明確に捉えることに成功した。毛先または毛根に向かうなぞり方向の違いによる触覚変化も明らかに捉えられており、指先で判別が難しい微妙な手触りでも十分に見分ける能力を持つ触覚センサデバイスが初めて実現された。

### 2. 深層学習とナノ触覚技術の組み合わせにより人間を上回る触覚識別能力を実現

概要:

高解像度のナノ触覚デバイスで計測した多数の触覚データに対する深層学習を実施することで、人間の指先を上回る高い触覚識別能力が得られることを実験により実証した。デニムやフリースを含む布地 10 種類においては、識別テストにおいて最高 99.4% の識別精度を実現した。微妙な手触りの違いを持つ 7 種類のティッシュペーパーに対して学習とテストを行った場合においても、最高 80.4% の高い識別精度を実現した。この場合の人間による識別精度は 31% 以下であったことから、深層学習とナノ触覚技術の組み合わせにより、人間を上回る触覚識別能力が実現可能であることが示された。

### 3. アレイ型ナノ触覚センサによる「硬さの空間分布」と「低摩擦下の滑り」の高精度検知

概要:

複数接触子を集積化したアレイ型ナノ触覚センサにより、対象走査時に表面硬さの分布を 100 $\mu$ m の空間位置精度で可視化することに初めて成功した。皮膚の表面で堅さの違う「しこり」の部位を十分に知覚可能な性能を実現している。また、アレイ型ナノ触覚センサを内視鏡手術用鉗子の把持部分に実装し、把持荷重の分布イメージ変化から把持物体の滑り発生を検知する滑り触覚技術を実現した。これは低摩擦状態でも医療用鉗子上での滑り検知を可能とする初めての技術であり、Nature Electronics 誌による IEDM2019 Research Highlights の 1 件に選出された。

<科学技術イノベーションに大きく寄与する成果>

### 1. ハンディー型触覚計測機「手触り感スキャナー」の実現

概要:

走査速度や移動距離の変化とともにナノ触覚センサの各種信号を記録するハンディー型の計測装置「手触り感スキャナー」を実現した。これにより、計測対象の大きさや場所に依らず微細な「表面凹凸形状」、「局所摩擦力」、「表面硬さ」の分布を迅速に取得し、その場で分析することを可能とした。深層学習による識別装置を組み合わせた手触り感スキャナーを 2019 年のセミコンジャパンに出展し、開催日の 3 日間、ブースの来場者が技術を試せるデモンストレーションを実施した。

### 2. ナノ触覚技術を用いた手触り感定量化手法の構築

#### 概要:

ナノ触覚センサによる計測で得られた高精細触覚信号の解析から各種の信号特徴量を抽出し、アンケート調査(官能評価試験)で数量化された「ザラザラ感」や「なめらかさ」などの手触り感に重回帰分析等を実施して、それらの手触り感を定量化する手法を新たに構築した。各種の手触り感に深く関係する触覚特徴量を明らかにするとともに、それらを正確に取得できるセンシングシステムに実現した。ナノ触覚技術を用いた手触り感定量化手法は各種の応用分野において実用上も有効性が認められており、肌触りを重視する製品、美容・健康を改善する製品、自動車内装製品それぞれの手触り感数量化に向けた産学共同体制を構築することができた。

### 3. プロジェクトの知的財産成果(特許)の実施許諾契約締結による実用化開発

#### 概要:

本プロジェクトで開発した単一接触子型ナノ触覚センサの知的財産成果(特許)の2件について、2019年11月に実用化企業と香川大学の間で実施許諾契約締結に至った。現在もその実用化にむけた技術開発が実施されており、従来にない新しい触覚センシング技術の製品化により、触覚と関連する新しい製品分野の産業創出が期待される。それ以外のプロジェクト成果や特許等についても様々な企業との間で技術相談を進めており、成果の実用化に向けた活動を積極的に推進している。

#### <代表的な論文>

1. Kazuki Watatani, Kyohei Terao, Fusao Shimokawa, Hidekuni Takao, “A MEMS Tactile Sensor with Fingerprint-Like Array of Contactors for High Resolution Visualization of Surface Distribution of Tactile Information”, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.32, No.2, pp.305-314, Apr. 2020.

#### 概要:

プロジェクト後半期の主要成果であるナノ触覚神経網(アレイ型ナノ触覚センサ)の論文であり、指先の指紋に相当する触覚センサの接触子6本を指紋と同等の500 $\mu$ mピッチで1次元アレイに集積化した。各接触子の軌跡をずらす様に走査方向とデバイス面の間にヨー角をつけることで、計測対象表面の高解像度二次元触覚情報を取得することに成功した。編み目に方向性を持つ柔らかい布地表面を本センサで計測し、走査方向によって対象繊維が異なる変形と摩擦力の分布、すなわち手触り感を示すことを計測データによって初めて明らかにした。

2. Kanako Ando, Takashi Yamamoto, Yusaku Maeda, Kyohei Terao, Fusao Shimokawa, Masao Fujiwara, Hidekuni Takao, “Highly Sensitive Silicon Slip Sensing Imager for Forceps Grippers Used under Low Friction Condition” Technical Digest of IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM) 2019, pp. 422-425, San Francisco, USA, Dec. 2019. [\*Nature Electronics 誌による IEDM2019 Research Highlights の1/3 件に選出]

#### 概要:

腹腔鏡(内視鏡)手術用の遠隔操作型鉗子の把持部に8画素を持つアレイ型触覚センサを搭載し、低摩擦環境下における把持対象物の滑り検知を初めて実現・実証した論文である。対象物の把持状態をアレイ型触覚センサ上の分布荷重イメージでとらえ、その荷重移動の有無によって滑りの発生状態を検知可能とした。手術トレーニングに用いる模擬臓器をポリエチレンフィルムで包み、多層構造の臓器で発生する滑りモードを再現した実験において、表面摩擦力がゼロの状態でも臓器内部の滑りを的確にイメージングすることに成功した。

3. Kazuki Watatani, Kyohei Terao, Fusao Shimokawa, Hdekuni Takao, “Planar-type MEMS tactile sensor integrating micro-macro detection function of fingertip to evaluate surface touch sensation”, Japanese Journal of Applied Physics, Volume 58, Number 9, pp097002-1 - 097002-9, Aug. 2019.

#### 概要:

指紋と同様な先端部の断面形状を有する接触子 1 本を持つナノ触覚センサの論文である。本センサは広い範囲の接触力と摩擦力を取得するマクロ領域の触覚センサ部と、指先の指紋 1 本が取得する程度に狭いマイクロ領域の触覚センサを併せ持っており、一つのチップ上に集積化されている。マイクロ領域の触覚センサが持つ空間分解能は  $50\mu\text{m}$  以下であり、摩擦力に対する分解能(入力感度)は  $100\mu\text{N}$  である。これらの性能は指先が接触対象物の手触り感を見分けるために十分な能力であり、集積されたマクロ領域の触覚センサが検出する計測時の接触力と併せて、特に柔らかい対象である布地等の手触り感に与える接触力の影響を計測することに初めて成功している。

## §2 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

① 「ナノ触覚・応用開発」グループ (香川大学 高尾グループ)

研究代表者: 高尾 英邦 (香川大学創造工学部 教授)

研究項目: 研究総括と推進

**1 ナノ触覚技術の開発と改良**

1-1 ナノ触覚デバイスの研究

1-2 定量化アルゴリズムの策定

**2 3D2 アルゴリズムの検討と検証**

2-2 センサとハードウェアの実装

**3 センサ応用事例開拓と実証**

3-1 定量化アルゴリズム評価

3-2 ナノ触覚の応用実証

**4 ナノ触覚神経網の実現と改良**

4-1 ナノ触覚デバイスの神経網展開

4-2 ナノ触覚神経網の応用実証

② 「神経網アルゴリズム」グループ (岡山県立大学 有本グループ)

主たる共同研究者: 有本 和民 (岡山県立大学情報工学部 教授)

研究項目: 神経網アルゴリズムチーム統括・設計評価研究

**2 3D2 アルゴリズムの検討と検証**

2-1 触覚センサシステムの高精度認識化のための高効率信号処理の検討

**3 センサ応用事例開拓と実証**

3-3 3D2アルゴリズムの実証

**4 ナノ触覚神経網の実現と改良**

4-3 3D2 アルゴリズムの神経網適用

③ 「触覚試験」グループ (慶應義塾大学 三木グループ) ※平成 29 年度のみ参画

主たる共同研究者: 三木 則尚 (慶應義塾大学理工学部 教授)

研究項目: ナノ触覚定量化にむけた触覚基準サンプルの開発

**1 ナノ触覚技術の開発と改良**

1-3 触覚基準サンプルの検討

④ 「学習最適化」グループ (徳島大学 上手グループ) ※平成 30 年度より参画

主たる共同研究者: 上手 洋子 (徳島大学大学院社会産業理工学研究部 准教授)

研究項目: 触覚センサ信号用の学習 DNN 及び触覚特徴量抽出法の開発

**1 ナノ触覚技術の開発と改良**

1-4 最適な DNN 構成の実装と評価

**4 ナノ触覚神経網の実現と改良**

4-4 DNN からの特徴量抽出法の検討

(2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

研究開始当初より、当初の計画では予想されていなかった成果展開が得られた場合や、応用分野における新たな可能性が示された内容については、研究チーム外の企業または大学との連携を深めて共同実験ならびに共同評価を推進してきた。その協働関係が継続的に発展する場合や、開発上の基礎的な部分に双方の関与が及ぶ場合等については、単なる「連携」ではなく、研究チームの「メンバー」として本プロジェクトに参画するなど、目的と

必要性に応じてチーム内外のネットワーク、さらにはチーム体制そのものについて逐次最適化を重ねてきた。産業界から研究チームへの参画という意味では、開始当初の参画企業は1社であったが、プロジェクト終了時には4社に増えるなど、3社が上記の経緯を経てチームに参画した。また、技術の共同評価までを含めると本チームが連携した企業は総計6社にのぼる。国外研究者とのネットワーク形成については、本プロジェクト成果の一部を活用した Indian Institute of Science (IISc), Bengaluru, India)との共同研究を挙げることができる。日本学術研究会 二国間交流事業 インド (DST) の制度を活用し、2017年度～2018年度にわたって IISc Centre for Nano Science and Engineering のグループと香川大学の間で国際共同研究を実施している。その後、2019年より IISc の同グループ出身の博士研究員1名が本プロジェクトで雇用され、研究チームの一員として CREST プロジェクトに参画している。その一方で、2020年に入り、国内外における COVID-19 新型コロナウイルス感染拡大の影響から、当該研究員は2月にインドに一時帰国し、そのまま日本への再入国が叶わぬまま雇用期限が終了してしまったことは大変残念である。しかし、IISc との国際共同研究は今後も継続される予定があり、ここに構築された国際共同研究ネットワークも引き続き発展的に継続されると考えている。