

ヒューマンインタラクションセンサデバイスシステム技術の開発

Development of Patch Sensor Device System for Human Interaction

岸 和人*
Kazuhiro KISHI

大島 淳**
Atsushi OSHIMA

栗山 博道***
Hiromichi KURIYAMA

後藤 峻***
Shun GOTO

要 旨

リコーは内閣府の「SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）第2期／フィジカル空間デジタルデータ処理基盤」プログラムにおいて、Society5.0の一環としてテレプレゼンスやメタバースなど仮想空間や遠隔コミュニケーションなどでの活用が期待できる「フレキシブルな多点マルチモーダルセンサシステム技術」を関連各機関と連携し開発してきた。特にリコーが主導して基盤技術を開発した「パッチセンサシステム」は高いカスタマイズ性・汎用性により、ヒューマンインターフェースグローブ等、幅広い分野での応用展開が可能であり、触覚情報等のデジタル化とそのAI応用を社会実装するための基本的手段を提供しうる。本プロジェクトで開発された成果は、リコーが目指す「“はたらく”に歓びを」の実現に貢献する技術への応用が期待される。

ABSTRACT

Ricoh has been developing flexible multi-point multi-modal sensor system technology in collaboration with related organizations under the Strategic Innovation Program (SIP) Phase 2: Physical Space Digital Data Processing Infrastructure project of the Cabinet Office. This technology is expected to be used in virtual space and telecommunication, such as telepresence and the metaverse, as part of Society 5.0. In particular, Ricoh led the development of the basic technology behind the patch sensor system, which can be applied to a wide range of fields such as human interface gloves due to its high customizability and versatility. It can also provide a basic means for the widespread digitization of tactile and other types of information and their application to AI. The developments of this project are expected to be applied to technologies that will contribute to Ricoh's vision of finding Fulfillment through Work.

* 先端技術研究所 戦略統括センター
Strategic Management Center, Advanced Technology R&D Division

** 先端技術研究所 IMD研究センター
Intelligent Micro Device Institute, Advanced Technology R&D Division

*** リコーフューチャーズBU IJ電池事業センター
IJ Printed Battery Solution Business Center, RICOH Futures BU

1. 背景と目的

1-1 背景

近年、センサ技術の進化が急速に進み、多様な応用分野で需要が高まっている。特に近年注目されるメタバースやテレプレゼンスの領域では、ヒトの触覚情報を伝達しクラウドなどサイバー空間を介して処理・フィードバックする技術が注目され、柔軟な触覚センサシステムが求められている。

本稿では、内閣府のSIP（戦略的イノベーション創造プログラム）¹⁾においてリコーを含む5機関で開発した、圧力と温度を同時測定可能な「フレキシブルなマルチモーダルセンサシステム技術」と、中でもリコーが主導して基盤技術を開発してきた指先の触覚センサとして応用できる「パッチセンサシステム技術」の概要を紹介する。

1-2 SIPフィジカル

Fig. 1に示す通り、内閣府の「戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第2期／フィジカル空間デジタルデータ処理基盤（2018～2022年度）」では、次のⅠ、Ⅱ、Ⅲの3つの技術開発が設定され、大学、国立研究機関、企業で構成した6つのチームのプロジェクトとして、各課題を分担している。

- Ⅰ サイバー空間とフィジカル空間の連携を容易にできる共通プラットフォーム技術
- Ⅱ 日本が強みを持つ材料・デバイス技術を活かした超低消費電力IoTデバイス・革新的センサ及びシステム技術
- Ⅲ Society5.0実現とCPS構築のために必須なエッジに重点がおかれた社会実装技術

これにより、IoTシステムの特にフィジカル空間における処理コストを大幅に削減し、中小・ベンチャー企業を含む産業界の活性化を目指している。

1-3 「Ⅱ 革新的センサシステム」

リコーが参加するプロジェクトは「ヒューマンインタラクションセンサデバイスシステム技術の開発」と題し、東京大学（東大）染谷隆夫教授をリーダーに、東大・産総研・大日本印刷（DNP）・コネクテックジャパン（CTJ）・リコーの5機関で実施している。このプロジェクトでは前記の「Ⅱ 革新的センサシステム」の開発と社会実装に取り組んでいる²⁾。

このセンサシステムは、Fig. 2に示すような役割で、接触する対象物の認識と同時に温度などの状態情報を一括入手できる柔軟なシートセンサシステムである。このような接触情報を活用したモノ・ヒト

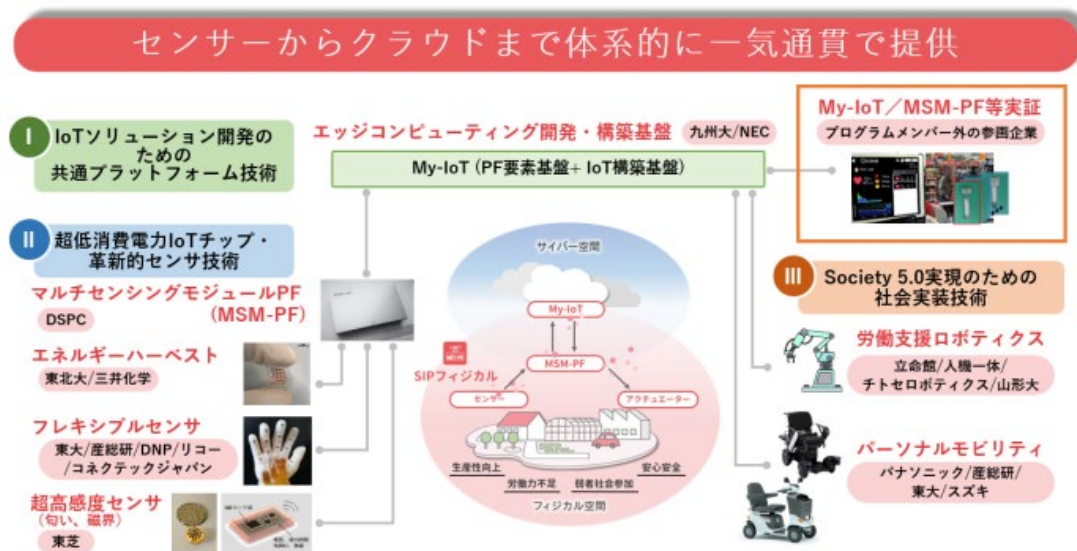


Fig. 1 SIP Physical, research organization and priority themes.

情報の収集及び管理のための情報取得システムを構築し提供することで、広く普及しているカメラ画像情報だけでは困難であった用途への適用を目指す。本稿では、リコーが主に開発したセンサ構造やインターフェースシステムを中心に報告する。

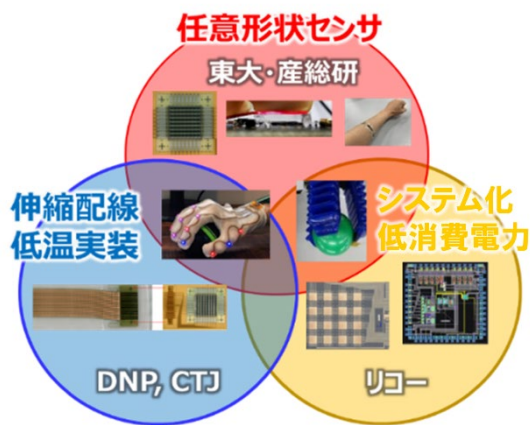


Fig. 2 Flexible sensor systems.

2. センサ技術の概要

2-1 フレキシブルセンサ技術

本プロジェクトでは、東大、産総研、CTJ、DNP、リコーで分担し、フレキシブルな多点・マルチモーダルセンサをシステム化した。主にセンサ部を東大・産総研・リコーが、伸縮配線・低温実装をNDPとCTJが、全体のシステム化及び駆動回路と低消費電力ICの開発をリコーが分担した。

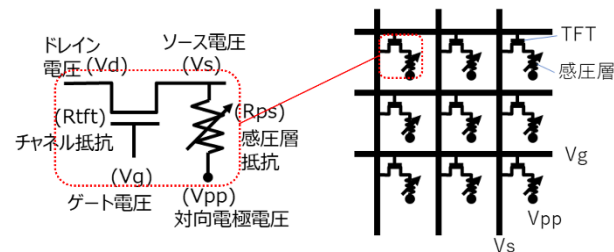
このフレキシブルセンサとしての基本技術は、「JAPER (次世代プリントドエレクトロニクス技術研究組合)」に参加して開発してきたものである³⁻⁸⁾。

まず、基本となる圧力分布センサの構造と動作について説明する。

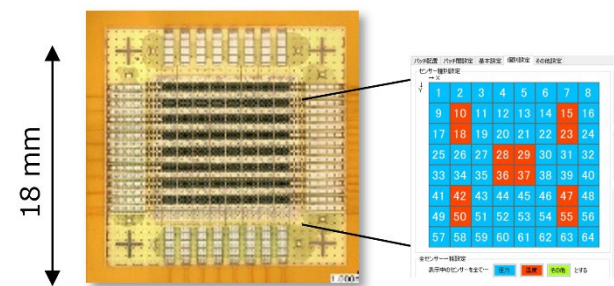
圧力分布センサの等価回路をFig. 3aに示す。圧力センサの1素子は、チャンネル抵抗 (TFT) と感圧層抵抗 (センサ層_可変抵抗) の直列回路と見なして、対向電極電圧 (V_{pp}) から圧力値を算出する。

検知点として配置された感圧層の素材は荷重変形により抵抗値が変化し、その抵抗値を駆動検出回路

で検出することで圧力に換算している。この圧力センサ素子をアレイ状に形成することで、多点圧力センサとして圧力分布を得られる。



a) Equivalent circuit of a single element of a pressure sensor and an arrayed multi-point sensor structure



b) Multipoint sensor: Example of pressure-sensitive and temperature-sensitive elements arranged simultaneously. Number of detection points: 64 (8 x 8)

Fig. 3 Multi-point pressure distribution sensor.

Fig. 3bに試作した多点センサ (後述するパッチセンサ) の外観写真を示す。18 mm四方のフレキシブルなシート上に、「縦8×横8」の64点の圧力検知点をアレイ状に形成している。

空間分解能としては約1.2 mmピッチであり、これは人の指先の空間分解能の1.5~2.0 mm程度を想定して設定されている。これにより、人の触覚情報に準じた解像度で対象物の接触状態をデジタルデータ化することが可能である。

なお、本システムでは先述の通り「抵抗値-圧力」の関係性を有する感圧材料で圧力状態を検知しているが、同様に「抵抗値-温度」の関係性を有する感温材料を使用することで、温度状態を検知することが可能である。このため、64点の検知点のうちいくつかを感温素子と置き換えることで、圧力分布と温度分布を同時に検出可能である。Fig. 3bの右側図はその

一例で、水色の領域を感圧素子に、赤い領域を感温素子にしたマルチモーダルセンサも実証してきた。

また、アレイ状センサ素子の抵抗値を検出する駆動方式としてはアクティブ型とパッシブ型の2種類を試作している。Fig. 3aに示した等価回路は有機TFT回路をPIシートにアレイ状に印刷形成するアクティブ型である。アクティブ型は高い検出精度と感度を得られる一方、パッシブ型に比べてコストが不利である。本プロジェクトでは、アクティブ型とパッシブ型の両方を用途に応じて採用できる。

3. パッチセンサシステム

3-1 多様な用途とパッチセンサシステム

SIPフィジカルがSociety5.0の実現に向けて想定するターゲット市場は、その研究開発計画にも記載の通り、中規模で数百～数千万円のシステム価格の事業領域である⁹⁾ (Fig. 4)。

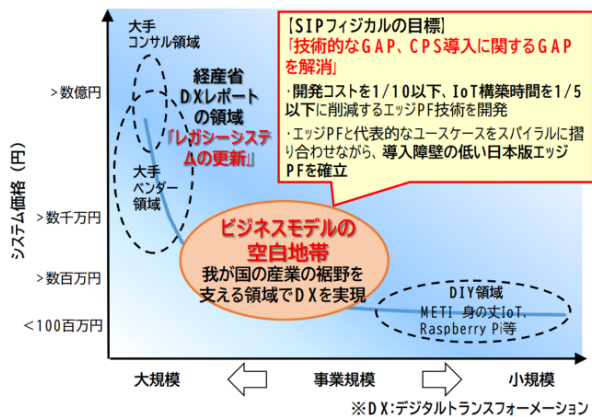


Fig. 4 SIP Physical target area.

この領域を事業として成立させるためには、「多種・中量」で顧客ごとに異なる要望と仕様に迅速に対応可能な高いカスタマイズ性を持ち、コストに配慮したシステムと構成が要求される。

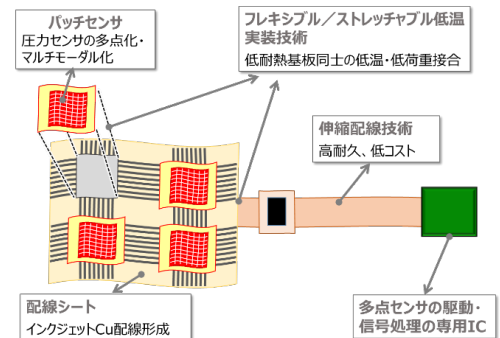
しかし、これまでのフレキシブルセンサシートは、顧客ごとにセンサの版を作り直す必要があったため、

多様な顧客要求に対応するためにはどうしても時間とコストがかさむという問題があった。

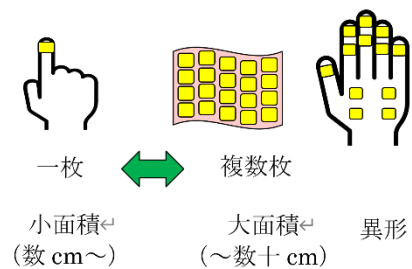
そこで、我々は高解像度で柔軟な多点センサを多様な設置シーンで利用するために、以下に示すパッチセンサシステムを構想し提案した。これはFig. 5に示すように、圧力センサシートを2cm四方程度の小片のパッチセンサにして、用途ごとに必要な枚数を必要な箇所だけフレキシブルな配線シート上に貼り付ける構成で、顧客ごとの要求と構成に合わせる事が容易となる。

形状に対する高いカスタマイズ性とは、Fig. 5a, 5bに図示する通りタイル状にパッチセンサを縦横に多数配置した構成だけでなく、例えばヒト型ロボットハンドの指先と手のひら部に複数枚のパッチセンサを配置する構成や、1枚のパッチセンサを指先の触覚センサとして利用する構成など、多様な形状と用途に柔軟に適用可能なことを指している。

任意形状の多点・マルチモーダルセンサに関する要素技術



a) Components



b) High customizability

Fig. 5 Patch sensor system.

また、低コスト化対応としてはセンサ部の製造コスト低減が挙げられる。従来のように異なる形状ごとに異なる版の設計・製造が必要な構造では、特に大面積の場合には異物混入によるドット欠けなどでの歩留まり低下が避けられなかった。

これに対して提案のパッチセンサシステムは、基本となるパッチセンサ部を共通にし、一度の印刷で多数のセンサを形成して小片に切り分けて製造するため、歩留まりを向上させた上でのコスト低減が可能となる。

3-2 コースター型パッチセンサ

リコーは前記パッチセンサシステムの技術的な成立性を検証するため、10 cm四方のシート状に形成したコースター型パッチセンサを試作した^{10,11)}。

Fig. 6に示すコースター型センサシートは、1個当たり「縦8×横8」で64点のレイ状に検知点を備えたパッチセンサを、約10cm角の配線シート状に「縦4×横4」で計16枚のパッチセンサを貼り付けることで、全体で1,024点（縦32×横32）の圧力検知点を備えている。

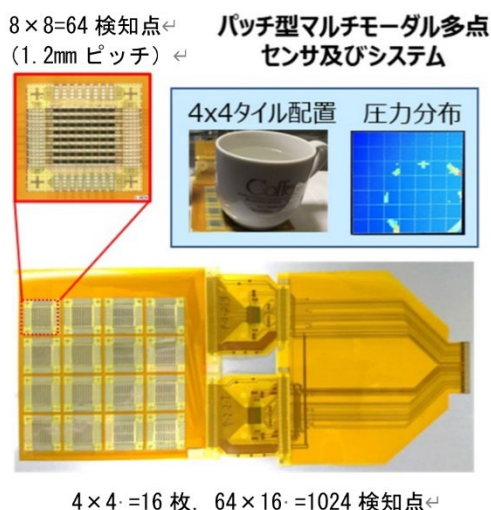


Fig. 6 Coaster-shaped patch sensor.

センサシート上にコップを載せると、コップ底部の形状や位置を検出するとともに、分布圧力の変化からコップ内の水量の増減を検出できる。また、用

いるパッチセンサを圧力検知素子だけでなく温度素子を加えたマルチモーダルタイプにすることで、コップ内の液体が水とお湯のどちらであるかを判別可能なことを確認している。

このようにパッチセンサを縦横にタイル状に敷き詰める構成は圧力分布を有する大判のセンサシートへ発展させる基本構成である。

大判の圧力分布センサシートの社会実装例としては、A4サイズ程度のセンサシートをランチョンマットとしてテーブルに敷き、食器を載せて食事の進み具合を遠隔でも検知して記録する見守り用途や、フレキシブル性を活かして病院の手すりや丸棒に巻き回し、リハビリ用途とすることなどが考えられた。

3-3 センサシートとパッチセンサの断面構造

センサシートは、パッチセンサと配線シートで構成されている。Fig. 7にその構造断面を模式化して示す。

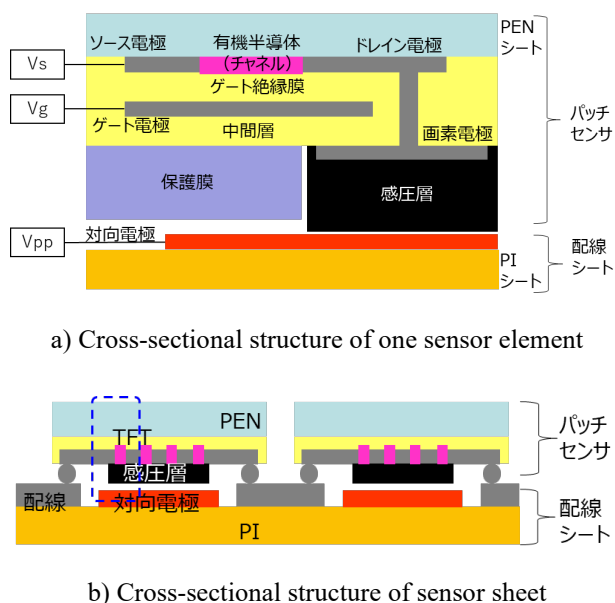


Fig. 7 Schematic diagram of the cross-sectional structure of a patch sensor.

パッチセンサには、Fig. 3aで示したチャンネル抵抗として用いる有機半導体TFTと電極配線及び感圧層をPENシート上に印刷し形成している。一方、配線

シートには、用途によって異なるパターンとなる配線とともに、センサ出力を V_{pp} として取り出す対向電極を形成している。この構造により、複数の前記パッチセンサを配線シート上に自由な配置で並べることで、大きさや形状の自由度が高いセンサシートが得られる。

リコーは、前述したパッチセンサシステムとパッチセンサ構造を構想・策定し、産総研柏センターの試作ラインを用いてパッチセンサを製作した。今回は、パッチセンサ用にTFT素子を「縦8×横8」で64個のアレイ構造として、1.2 mmピッチで線幅0.4 mm配線の版を設計・製作し、A3版のマザー基板の半分であるA4領域に80個形成した。

さらに、インクジェットで有機半導体（チャネル）を形成した後、感圧素材を配置してパッチセンサを構築する。センサシートとしては、パッチセンサを後述する配線シートに貼り付ける形で実装しており、この実装に関しては産総研やCTJの協力で行った。

3-4 配線シートとIJ印刷Cu配線

センサシートの用途や大きさが異なっても、パッチセンサは共通であるが、配線シートは用途ごとに大きさや配線レイアウトを変更する必要がある。基本的にはFPCなどのフレキシブル基板の配線を都度設計して利用する。

配線パターンの例として前述したコースター型をFig. 8に示す。1個当たり18 mm四方で「縦8×横8」で64素子のパッチセンサをアレイ状に4×4個配置し、10 cm四方のセンサシート全体では1,024点の圧力を検知できる。模式的に示したFig. 7bの通り、縦横の各パッチセンサ間は V_g と V_s 配線として電気的に接続されている。配線数は V_gV_s 信号線（縦32+横32本）+対向電極 V_{pp} 線4本である。

また、今回のプロジェクトでは配線をIJ（インクジェット）印刷で形成した配線シートも試作し動作を確認した。配線のパターンはFig. 8と同様であるが、Fig. 9に示すイメージの通りIJによる製版レスで配線を形成でき、顧客の多様なセンサ形状に対して

より迅速かつ低コストで対応が可能なセンサシステムの提供に寄与できる技術を開発した¹²⁾。

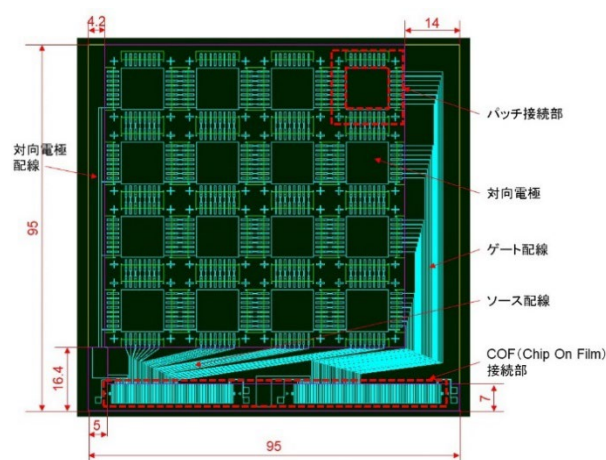


Fig. 8 Example of wiring pattern of wiring sheet.

Cuインクのインクジェット印刷+焼成技術を開発

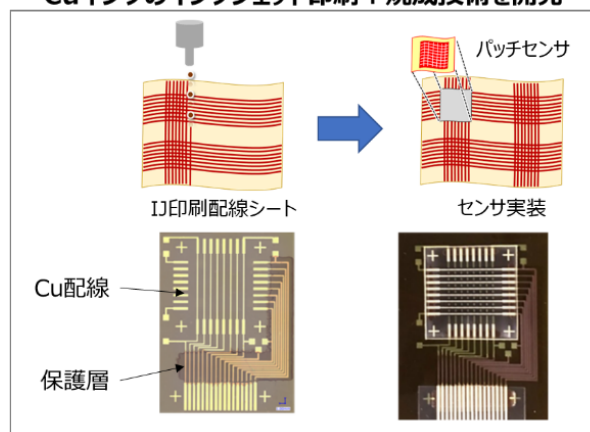


Fig. 9 Wiring using Cu ink.

このIJによる配線形成はPI（ポリイミド）シート上にCuインクを印刷の上、光焼成して作成した。従来のAg配線に比べてマイグレーションやコストで有利なフレキシブル配線の形成を可能としており、将来的により実用的なフレキシブルな実装手段を提供しうる。

3-5 駆動・信号処理ICと低消費電力化

社会実装のためのセンサ実用化に必要なシステム技術として、データ取得を低消費電力で実行する駆動・制御回路を同時に開発してきた。

システム構成はFig. 10に示す通り、センサ駆動部と制御基板からなり、全体としてシート状で柔軟性を持たせたセンサ駆動部はコネクタを介して制御基板に接続されている。センサ駆動部にはFPC上の複数のパッチセンサとCOF基板上の駆動ICが配置され、センサを駆動して信号を検出する。制御基板は駆動ICの動作制御及びデータ処理を行うとともに、有線（USB）と無線（BLE）の外部I/Fを備え、PCなどと通信してデータ送信を行い、PCアプリの画面上で圧力や温度の分布をヒートマップとして表示できる。

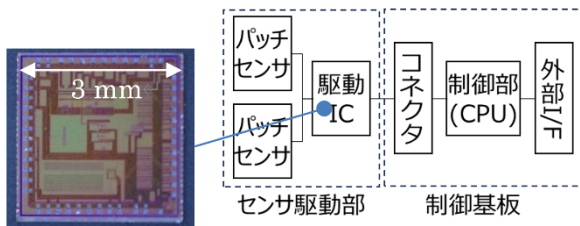


Fig. 10 Sensor drive and control circuits.

また、センサシステムとしての用途に汎用性を持たせるため、制御機能としては駆動ICを4個まで増やせる構成とした。前述の通り、駆動ICは1個でパッチセンサ「16個（縦4×横4）_1,024検知点（Vg32本×Vs32本）」まで対応するため、大きな変更なくパッチセンサを最大「256個（縦16×横16）_16,384検知点（Vg128本×Vs128本）」まで増やすことが可能である。

前述したパッチセンサに使用する有機半導体材料はp型チャンネルであり、ドレイン電位Vdをソース電位Vsよりも低くするため通常は負電源を用いることが多い。今回、トランジスタ動作特性を検討して正電源を用いた構成とすることで駆動ICの設計を簡素化したので、その概要を以下に示す。

通常の負電源構成を動作特性で示すと、ソース電位VsがGNDの次式構成となる。

$$V_{g-off} > V_s (= GND) > V_d > V_{g-on} \dots (1)$$

なおここで、ドレイン電位Vd、ゲートon/off電位Vg-on/offである。

今回は正電源を用いて駆動ICを動作させるため、Vg-onがGNDの構成とした。

$$V_{g-off} > V_s > V_d \geq V_{g-on} (= GND) \dots (2)$$

さらに、本駆動ICは外部電源の接地を変更することでパッシブ型のパッチセンサにも対応できる。

駆動ICについてはリコーのIC設計技術によりマトリクス状の「多点センサ用駆動・信号処理専用IC」を世界で初めて開発した。この専用ICはIC駆動電圧を低減するとともに、低消費電力化のために従来のICの機能と消費電流を見直した。

具体的には、有機半導体TFTアレイの応答性を把握して走査時間を適正化するとともに、駆動方式を従来の一括駆動から時分割駆動に変更した。これにより駆動するICの数を可変とでき、パッチセンサの個数（センサの面積）に応じた数の駆動ICだけを使用して消費電流を抑制した。

さらには、駆動ICの制御負荷が低減することで、システム全体としての低消費電力化が可能となり、Fig. 11の通りJAPERで試作された同サイズの従来シートセンサと比較して無線送信で約1/15の低消費電力化を達成し、電池での24時間以上の連続稼働を実現した。

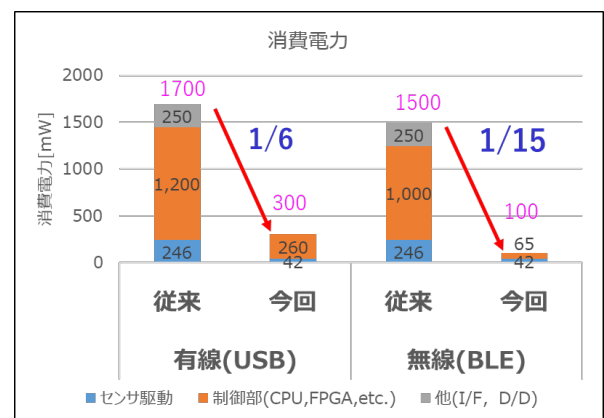


Fig. 11 Comparison of power consumption of sensor systems.

3-6 その他要素技術

前記コースター型センサは、センサと駆動基板の接続に柔軟性のあるFPCで配線を製作して接続しているが、次節記載のロボットハンドのように大きく屈曲する用途では伸縮配線を配置する。この伸縮配線はDNPが技術開発¹³⁾したもので、世界最高レベルの約1,000万回程度の伸縮耐性を有する微細配線技術とともに、当初の1/8の低コスト量産化も実現している。

また、低温プロセス実装技術は、CTJが開発したもので、有機TFTやCu配線・伸縮配線などを低ダメージでパッチセンサ及び配線シートと実装することが可能である。

これら各社の保有技術は、デバイス・部材のビジネスとして個別に様々な製品形態や用途展開が見込めるため、各社において社内事業部等との体制を構築し、各要素技術の事業化に向けて準備を進めている。

4. 社会実装への取り組み

4-1 ロボットハンド用触覚センサ

社会実装への取り組みは、各社連携してこれを進めており、ここでは、その例をいくつか紹介する。パッチセンサシステムの社会実装検討では、ロボットハンドの性能向上のために圧力分布センサを指先に取り付け、触覚センサとする構成を試作した。

Fig. 12にソフトロボットハンドの指先にパッチセンサを1枚設置した構成を示す。この樹脂製のソフトロボットハンドは空気圧により屈曲するため、3本用いることで物品の把持が可能である。物品をつかむ表側に圧力分布センサを配置し、裏側の蛇腹部は空気圧で伸張するため伸縮配線を配置している。

Fig. 13に3本指のロボットハンドに実際にボールを把持させた様子とその際の圧力分布の様子を示す。画像では同じ大きさとし色のボールであるが硬さが異なり、把持した際に検知される圧力分布が異

なる。柔らかいボールでは広い範囲に圧力が分布するのに対して、硬いボールでは高い圧力が狭い範囲に集中するため、どちらのボールを把持しているか、判別可能である。

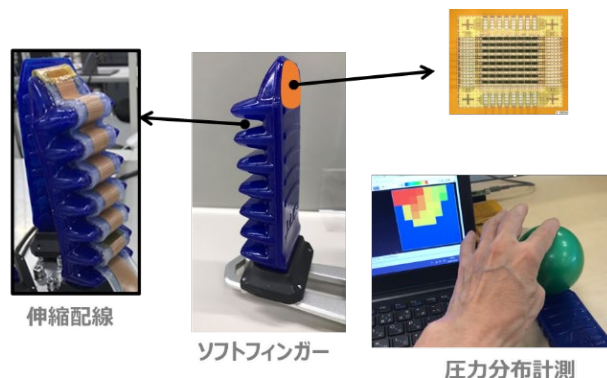


Fig. 12 Tactile patch sensor.

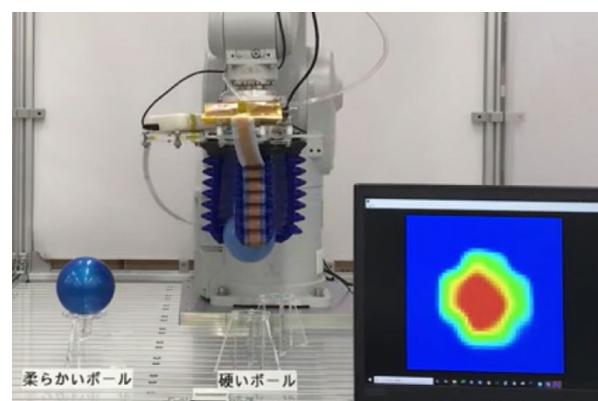


Fig. 13 Robot hand grasping operation.

4-2 グローブ用センサ

市場及び周辺技術の動向調査を進めてきた結果、新しい任意形状の多点・マルチモーダルセンサを用いたサービス事業はまだ立ち上がっていないことが確認された。

一方で、13回の展示会出展や企業ヒアリングなどを通じ、近年活発に開発されている、テレプレゼンスやVR/ARなどで、グローブ型の触覚センサがメタバースにおけるヒューマンインターフェース用途として、潜在的なニーズと大きな市場が存在することが明らかになった。

このため、ヒトの指先の動きと触覚を検出し可視化できるグローブ型のセンサデバイスのプロトタイプ試作を行った。その概観をFig. 14に示す。4本の指先にパッチセンサを配置するとともに、指の関節位置には産総研が開発した高感度ひずみセンサを配置して指の曲げ伸ばし量を検出し、仮想空間上のハンドモデルで動作をリアルタイムで再現させている¹⁴⁻¹⁶⁾。



Fig. 14 Tactile sensor for glove.

社会実装の応用例として、テレプレゼンスやメタバース、仮想空間や遠隔でのコミュニケーション、技能向上や技術伝承などを探索している。具体的な例としては、Fig. 15に示す楽器の演奏やマッサージなどの技能伝承やサービススキルの記録・伝承・分析、遠隔サービス、ゴルフなどの機材を握るようなスポーツの分析やアミューズメント利用などが挙げられる。楽器の演奏者やマッサージ師の指の動きなど、熟練者の巧みな技能をデジタル化・定量化することで、これまで特定の職人に限られていた技能を効率良く指導し、その伝承が容易となる。



Fig. 15 Globe sensor applications.

今回作成したパッチセンサシステムと、それを応用したヒューマンインターフェースグローブは、多様なセンサ形状を迅速かつ低コストで構築できる柔軟性を特徴としている。これにより、様々な人の技能をデジタル化・定量化できる。人の把持動作や触覚情報をデジタル化することで、記録・電送・分析など、幅広い分野で革新的な応用が期待できる。

5. むすび

本稿では、Society5.0普及のために高いカスタマイズ性と汎用性を実現するパッチセンサシステム技術と、その社会実装の一つとしてヒューマンインターフェースグローブについて紹介した。ヒトの指先の動きと触覚を検出することで、技能向上や技術伝承、テレプレゼンスやメタバースなど、仮想空間や遠隔でのコミュニケーションなど幅広い分野で革新的な応用が期待されている。

謝辞

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務の結果として得られたものです。

参考文献

- 1) NEDO: 事業紹介「戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 第2期/フィジカル空間デジタルデータ処理基盤」, 2023, https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100147.html.
- 2) NEDO: SIP第2期 最終成果報告書 フィジカル空間デジタルデータ処理基盤, 2023, https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/sip2_seika/physical1.pdf.
- 3) 井上博史: プリンテッドエレクトロニクス, フレキシブル材料が切り開く未来, 表面科学, Vol. 34, No. 10, pp. 553-554 (2013).
- 4) NEDO: 事業紹介「次世代プリンテッドエレクトロニクス材料・プロセス基盤技術開発」, 2019, https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100030.html.
- 5) NEDO研究評価委員会: 「次世代プリンテッドエレクトロニクス材料・プロセス基盤技術開発」事後評価分科会 資料5 プロジェクトの概要説明資料 (公開), 2019年11月, <https://www.nedo.go.jp/content/100899819.pdf>.
- 6) NEDO: 第61回研究評価委員会「次世代プリンテッドエレクトロニクス材料・プロセス基盤技術開発」事後評価報告書 (案) 概要, 2020, <https://www.nedo.go.jp/content/100922598.pdf>.
- 7) H. Ushijima: Developments of high precision printing processes for fabricating the flexible electronics, ICEP (International Conference on Electronics Packaging) (2017).
- 8) K. Mukaiyama: Load distribution and forearm muscle activity during cylinder grip at various grip strength values, Hand Surgery and Rehabilitation 41 (2), pp. 176-182 (2022).
- 9) 内閣府: SIPフィジカル研究開発計画書, 図表1-5, 2021, https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/keikaku/2/2_physical.pdf.
- 10) 近藤均: センサシート, ロボットハンド及びグローブ, 特開2021-60388.
- 11) H. kondo: Sensor sheet, robot hand, and glove, US11,493,392 B2.
- 12) 後藤峻: インクジェット技術による配線印刷とセンシング, 電池のデジタル製造への応用, FIoTコンソーシアム第2回研究会 (2021).
- 13) DNP: ロボットグリッパー向けの伸縮自在な接触センサーユニットを開発, DNPニュースリリース, 2020, https://www.dnp.co.jp/news/detail/10158733_1587.html.
- 14) 金澤周介: 人の動作ログに向けた超高感度・高精度フレキシブルひずみセンサ, 産総研HARCS2021 ポスターNo. 4, 2021, https://unit.aist.go.jp/harc/symposium/HARCS2021/poster_contents/4_Kanazawa.mp4.
- 15) 金澤周介: 人の動きのデータ化に向けたウェアラブルひずみセンサの開発, 産総研HARCS2020 ポスター, 2020, https://unit.aist.go.jp/harc/symposium/HARCS2020/contents/07_poster.pdf.
- 16) 金澤周介: 社会実装に向けた人間拡張研究センターの技術紹介②手のデジタルツイン形成に向けたひずみセンサグローブ, 産総研柏センターニュース2022/01/31, <https://www.aist.go.jp/kashiwa/ja/news/kashiwa-interview-kanazawashusuke2022.html>.