

## 温度センサアレイを高速・低消費電力で読み出す新技術を開発 生物を参考にしたノイズに強い新規デジタル方式

### ポイント

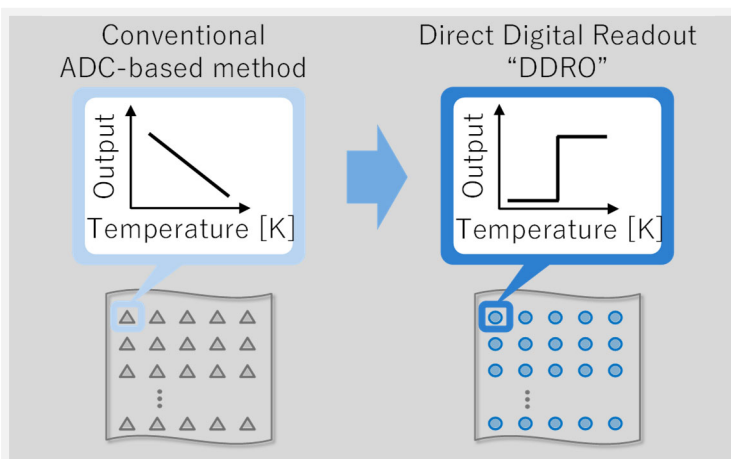
- ① 近年、人の皮膚のように広い面で温度や触覚を感じる「電子皮膚 (e-skin)」の研究が急速に進んでいます。しかし従来の電子皮膚システムでは、アナログ回路とアナログ-デジタル変換器 (AD 変換器) が必要であり、高密度センサアレイでは遅延時間や消費電力が重要な制約となっています。
- ② 本研究では、温度によって状態が急激に変化する材料を用いたセンサを用い、その出力をアナログ変換せずに直接デジタル信号として読み出す「ダイレクト・デジタル読み出し方式 (DDRO)」に基づくセンサアレイシステムを世界で初めて開発しました。
- ③ 本手法は温度センサに限らず、圧力や化学センサなど他のセンサにも応用可能であり、ウェアラブル機器やロボット、医療デバイスへの展開が期待されます。

### 概要

ロボットハンドや大電力を扱う機器では、大量の温度センサを2次元上に並べて温度分布の情報を取得することが求められます。しかし、多数のセンサを並べたセンサアレイでは配線が長くなるため、配線ノイズや寄生容量※1の影響により信号が劣化しやすく、大規模化が難しいという課題がありました。そのため、大量のセンサから効率的に情報を読み取る電子回路技術の確立が望まれていました。

本研究では、ノイズの影響を受けにくく、大規模化に適した新しい温度センサ読み出し方式を開発しました。九州大学大学院システム情報科学研究所の矢嶋赳彬准教授、大学院システム情報科学府修士課程の萱野幸佑氏（研究当時。現キオクシア株式会社）、株式会社村田製作所の高相圭氏らの研究グループは、温度によって状態が急峻に切り替わるセンサ（温度に応じて電気抵抗が急激に変化し、0か1のように判別できるセンサ）とデジタル回路を組み合わせ、センサ信号を直接デジタルで読み出す新方式を提案しました。その結果、1024個のセンサからなるセンサアレイにおいて、1センサあたり最小12.2ピコジュール、1行（32センサ）あたり710ナノ秒という、極めて低消費エネルギーかつ高速な読み出しを実現しました。

今回の成果は、人の皮膚のように広い面で温度を感じる「電子皮膚」やウェアラブルセンサの高性能化に役立つと期待されます。本研究成果は半導体分野の国際会議「VLSI シンポジウム」において2026年6月17日（現地時間）に発表されます。



### 研究者からひとこと：

提案したセンサ読み出し方式は、ヒトの皮膚の温度読み出し方法を参考にしたものです。皮膚は正確な温度の絶対値を出力することはできませんが、10-100万個という大規模なセンサアレイからリアルタイムかつ省エネに温度を読み出すことができます。本研究は、生物の仕組みから新しい回路技術を生み出した例だと言えます。

（矢嶋赳彬）

参考図：温度読み出し方法

…従来のアナログ-デジタル変換（AD変換器）に基づく方法と、  
センサの0/1出力を直接デジタル回路で読み出す提案方法（“DDRO”）

## 【研究の背景と経緯】

近年、ロボットやウェアラブル機器の高度化に伴い、人の皮膚のように広い面で温度や触覚を感じる「電子皮膚 (e-skin)」の研究が急速に進んでいます。医療分野では、患者の体温分布を連続的に測定することで炎症や血流異常の早期発見が期待されています。また、ロボット分野では、物体に触れた際の微妙な温度変化を検知することで、安全で精密な作業の実現につながります。このような応用では、数 100 から数 1,000 点に及ぶセンサを高密度に配置し、それらを同時に高速で読み取ることが求められます。

しかし従来の電子皮膚システムでは、各センサの出力がアナログ信号であることが一般的であり、その読み出しにはアナログ回路とアナログ-デジタル変換器 (AD 変換器) が必要でした。この方式では、センサ数が増えるほど配線が長く複雑になり、外来ノイズや配線抵抗、寄生容量の影響が大きくなります。その結果、信号の精度が劣化し、大規模化に伴って読み出し性能が急速に低下するという問題がありました。特に電子皮膚のように柔軟基板上にセンサを配置する場合、配線がチップ外に広がるため、半導体イメージセンサのような集積回路内での最適化手法をそのまま適用することが難しいという課題もあります。

さらに、高密度センサアレイでは消費電力も重要な制約となります。多数のセンサを高頻度で読み出すためには、読み出し回路のエネルギー効率を大幅に改善する必要があります。従来のアナログ方式では、増幅器や AD 変換器が必要となり、消費電力や回路規模の増大を招いていました。また、読み出し時間と消費電力の間にはトレードオフが存在し、高速化すると電力が増加するという問題も避けられませんでした。

このような背景から、ノイズに強く、かつ大規模化しても性能が劣化しにくい新しい読み出し方式が強く求められていました。そこで生物に目を向けると、人間の皮膚は大規模な温度センサアレイになっており、上記の求められる温度読み出しを実現していることがわかります。皮膚の温度読み出しの仕組みを調べると、人間の温度感覚が厳密な連続値ではなく、ある程度のしきい値的な応答を示しています。つまり、センサアレイの応用によっては、必ずしも高精度なアナログ値を取得する必要はなく、より単純な情報表現でも実用的なシステムを構築できる可能性があります。このような観点から、センサの出力を最初からデジタル的に扱い、配線上を流れる信号を単純化することで、ノイズの影響を根本的に抑えるアプローチに注目しました。

本研究は、このような課題認識のもとで、従来のアナログ読み出しに代わる新しい原理に基づくセンサ読み出し技術の確立を目的として行われたものです。従来技術の延長では解決が難しかった「高密度・低消費電力・高耐ノイズ性」を同時に満たすために、センサそのものの動作原理と回路アーキテクチャの両方を見直す必要がありました。その結果として、センサ出力を直接デジタル信号として扱う新しい読み出し方式の着想に至り、本研究の実現へとつながりました。

## 【研究の内容と成果】

本研究では、温度によって状態が急激に変化する相転移材料(※2)を用いたセンサを用い、その出力をアナログ変換せずに直接デジタル信号として読み出す「ダイレクト・デジタル読み出し方式

(DDRO)」に基づくセンサアレイシステムを世界で初めて開発しました。従来の方式では、配線上を流れるアナログ信号がノイズや寄生成分の影響を受けやすく、大規模化に伴って精度が低下する課題がありました。本手法では、信号を最初からデジタル化することで、配線上でのノイズ影響を構造的に抑制しています。さらに、抵抗値の違いを利用する方式と、充電速度の違いを利用する方式の 2 つの動作モードを導入し、特に後者では定常状態を待たずに判定できるため、高速化を実現しました。その結果、1024 個のセンサからなるフレキシブルセンサシートと 180nm プロセスで試作した回路チップを用いて、1 センサあたり最小 12.2 ピコジュールという低消費エネルギーと、1 行あたり 710 ナノ秒の高速動作を達成しました。

## 【今後の展開】

今後は、センサの高密度化と多機能化を進め、より人の皮膚に近い分解能での温度・触覚検知の実現を目指します。また、本手法は温度センサに限らず、圧力や化学センサなど他のセンサにも応用可能であり、ウェアラブル機器やロボット、医療デバイスへの展開が期待されます。さらに、読み出し回路の集積化や低電圧化を進めることで、エネルギー自立型デバイスへの応用も視野に入ります。今後は実環境での動作検証や長期信頼性の評価が課題となります。

## 【用語解説】

### (※1) 寄生容量

配線同士やセンサ素子内部に生じる意図しない電気容量のこと。回路動作に大きな影響を与えるため、寄生容量を考慮して回路・システムを設計する必要があります。

### (※2) 相転移材料

氷が解けて水になるように、物質の性質が急激に変化する現象を相転移と言います。チタン酸化物やバナジウム酸化物など一部の物質では、固体状態のまま内部の電子や格子の状態が相転移を起こし、電気抵抗が急激に変化することがあります。そういった材料を本研究のセンサに使用することができます。

## 【謝辞】

本研究は、東京大学VDEC活動を通して、日本ケイデンス・デザイン・システムズ社の協力で行われたものです。

## 【論文情報】

発表学会：2026 IEEE Symposium on VLSI Technology & Circuits

タイトル：A Highly Scalable and Noise-Robust Direct Digital Readout (DDRO) for E-Skin Temperature Sensor Arrays Achieving 12.2 pJ/Sensor and 710 ns/Row

著者名：Kosuke Kayano, Sang-Gyu Koh, Shiyuan Sun, Satoshi Hamasuna, Takaaki Miyasako, Tadasu Hosokura, and Takeaki Yajima

## 【お問合せ先】

<研究に関すること>

九州大学 大学院システム情報科学研究所 准教授 矢嶋赳彬（ヤジマ タケアキ）

TEL：092-802-3759 FAX：092-802-3759

Mail：yajima@ed.kyushu-u.ac.jp

<報道に関すること>

九州大学 広報課

TEL：092-802-2130 FAX：092-802-2139

Mail：koho@jimu.kyushu-u.ac.jp