

知的集積システム



技術解説

三浦典之*

Intelligent Integrated Systems

Key Words : Society 5.0, Intelligent sensor, New-principle edge computer,
Physical security

はじめに

近年の人工知能をはじめとする情報科学技術の爆発的な発展は、指数関数的なコンピュータの情報処理性能の向上によって牽引されてきた。しかし、これまでコンピュータの性能向上を支えてきた半導体集積回路製造技術の微細化と高集積化という、いわゆる古典的なムーアの法則¹⁾には、物理的・経済的限界が見えてきている。そこで、単純な回路の高集積化に依存することなく、情報処理性能の向上を維持するポスト・ムーア技術が強く求められており、その一つの方向性は、個別の集積回路の単純な情報処理性能の向上を追求するのではなく、多数の集積回路で構成される集積システム全体で処理される情報の「価値」を最大化することにある。例えば、内閣府が第5期科学技術基本計画において提唱した「Society 5.0」は、大量の自律センサ群、ビッグデータ解析を行う大規模計算機群、高信頼かつ高精度なアクチュエータ群で構成される「巨大な集積システム」と見なすことができる。この巨大な集積システムの中で循環する大量のデータから、新たな「価値ある情報」を見出す技術が強く求められている。この情報世界と物理世界を介する高度なインタラクションを指向する、Society 5.0において、両世界の境界に物理的な実体をもって必ず存在する集積回路が、価値ある情報の自律的探索を可能とするた

めの「知的な進化」こそ、我が国が目指すべき新たな未来社会のカタチを具現化するために必須の技術だと考える。

具体的には、(1) 価値あるデータを自律・選択的に計測する機能を持った「知的センサ技術」、(2) 収集データを高効率かつリアルタイムにその場解析する「新原理エッジコンピューティング技術」、(3) 危険や外乱を能動的に捉えフィジカル空間へのアクションを安心・安全に実行するための「物理セキュリティ技術」、そして、これらの知性を有する集積回路機能を合理的に統合した「知的集積システム」が、爆発的に進化する情報科学技術の適用範囲を延伸し、複雑な社会問題を解決するための新たな情報科学技術を創出すると考えている。以上の背景を踏まえ、本稿では、当研究室で行っている上記(1-3)のコア技術についての取り組みを紹介する。

知的センサ

Society 5.0では、情報科学技術を駆使して社会問題を解決する答えを見出そうとしている。しかし、全ての社会問題は物理世界に存在する。そこでセンサは、物理世界の様態をデジタルの数値データに変換し、物理世界の社会問題を情報世界でコンピュータが理解できるカタチに変換している。つまりセンサが担うのは、物理世界を情報世界に正確に転写する機能である。Society 5.0では、大量かつ高精度のセンサ群により、物理世界の完全なデジタルコピー「デジタルツイン」を形成しようとしている。センサは、この中で情報世界が取り扱う入力形作る重要な役割を担っており、出力となる社会問題の解決策にも大きく影響する。そこで、当研究室では、高精度のデジタルツインを形成する知的センサを研究している。集積回路技術と集積可能な機械部品である Micro Electro Mechanical System (MEMS) 技術



* Noriyuki MIURA

1980年10月生まれ
慶應義塾大学大学院 理工学研究科
総合デザイン工学専攻後期博士課程
(2007年)

現在、大阪大学大学院 情報科学研究科
情報システム工学専攻 教授
博士(工学)

TEL : 06-6879-7810

FAX : 06-6879-7812

E-mail : nmiura@ist.osaka-u.ac.jp

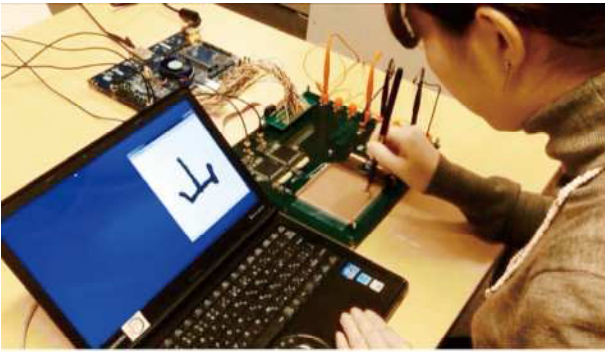


図1 開発した電子半紙のデモ風景

のめざましい発展により日々、小型で高精度のセンサが開発されてきているが、単純な計測精度の向上だけではなく、計測データの中に見出せる価値ある情報を見出すための、センサの「賢い」制御方法や計測結果の処理方法の正しい組み合わせについて、ハードとソフトの両領域で統合的に研究に取り組んでいる。例えば、人間が五感を通して経験的に得てきた計測データに見出せる高価値情報に関する知識と、センサに集積した情報処理回路による高価値情報の自律選択機能を統合した知的センサシステム構築を目指す。

図1は、繊細な筆遣いを直接検知できる高解像度のタッチセンサを利用した電子半紙の実装例である²⁾。タッチセンサは、身近にはスマートフォンの主要なヒューマンインタフェースとして普及している。ディスプレイ表面にXY方向に直行して形成されたメッシュ状の透明電極を利用して、人の手指の接近に伴う電極周辺の電界の変動を検出してタッチ個所を検出している。現在のスマートフォンに使用されているタッチセンサの透明電極のピッチは、おおよそ1cm弱であり、それほど高解像度ではない。我々は、これに対し一桁解像度を高めるために、ピッチ0.1mmの透明電極メッシュを搭載したタッチパネルを製造した。0.1mmまで高解像度化ができれば、人の手指だけでなくタッチしている筆の毛量を検知ことができ、スマートフォンやタブレットで自然なタッチでの書道や水彩画を楽しむことができる。

しかし、単に高解像度のタッチパネルがあっても、この電子半紙の実現は困難であり、ハードウェアとソフトウェアの両面で技術的課題を解決する必要があった。ハードウェア面での課題は、高解像度電極

で電界信号の強度劣化にあった。高解像度化のためには、電極の幅を一桁縮小する必要があり、それに応じて電極で捉えることのできる電界の量が減少し、結果的に信号強度が大幅に低下する。周辺のディスプレイから到来するノイズは一定のため信号対ノイズ比 (SNR: Signal-to-Noise Ratio) が劣化し、繊細な筆のタッチを検知するのが困難になる。そこで、周辺のノイズをコピーして信号から差し引くノイズキャンセラー回路を開発し、SNRの劣化を抑制した。ソフトウェア面での課題は、動作速度の低下にあった。タッチセンサでは、電極メッシュの交点での電界信号を走査することで、物体との接触強度の分布を計測することができる。解像度が一桁増えると走査点数は、二桁増加するため、パネル全面を走査するのに要する時間が増大し、動作速度が低下する。そこで、精度は低下するがパネル全面を並列に一括で電界信号検出した上で、物体の接触個所の候補を検出し、候補個所のみを詳細に走査するという二段階走査方式を開発し、この問題を解決した。開発したタッチセンサは、従来よりも一桁高解像度であることから、従来よりも二桁多い情報データを計測するキャパシティがある。しかし、不必要なデータ取得を省略するという「知的な進化」により効率の良いデータ収集が可能となったと考えることができる。また、実際に計測した筆の接触強度分布データを基に自然な書道表現を表示する方法も検討した。これには、実際に書道家にデモ機での書道を体験してもらった上で、より自然な表現に近づけられるように走査速度やにじみ表現を主観評価に基づきカスタマイズした。今後は、このように熟練者が経験的に体得している伝統的な知識を自動的に取り込めるような機械学習モデリングと統合し、高度な知的センサ技術を研究していきたいと考えており、近年は、人の感情を推定できる生体情報センサの研究を行っている。

新原理エッジコンピューティング

これまでの単純な半導体製造技術の微細化、ムーアの法則に限界が見えてきており、情報処理技術の発展を支えてきたコンピュータの性能向上を維持・加速するために、新しい原理に基づいて動作するコンピュータが求められている。これまでは、スーパーコンピュータやクラウドコンピューティングの分

野で盛んに研究されてきた領域であるが、Society 5.0では、物理空間へのリアルタイムの即時フィードバックが求められることから、ユーザーのエッジ端末での高性能情報処理技術が必須となる。そこで、当研究室では、ムーアの法則の限界を突破する、これまでとは異なるカタチの新原理エッジコンピュータを研究している。現在主流のCMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) トランジスタを利用した新しいコンピュータのカタチと非CMOSで構成される量子現象やナノフォトニクスなどの光を利用したコンピュータを開発している。

図2は、これまでの半導体微細化によるコンピュータダウンサイジングの極限を追求し、物理空間に物理的に融合する目に見えないほどに小さな「粉末コンピュータ」のプロトタイプである。加速度的に進んだ半導体微細化は、十分なコンピュータの計算機能を0.1mm角級の粉末状のシリコンIC内に集積できるほどに進化した。課題は、それらの粉末ICへの電力の給電とデータ通信にあり、筆者がこれまでに研究してきた無線給電や無線通信技術³⁾を応用できると考えている。



図2 開発した粉末コンピュータのプロトタイプ

このような物理環境に溶け込むコンピュータの応用は多岐に渡り、環境や人に調和する情報科学技術を模索するための鍵となる。例えば、負荷なく飲み込んで胃カメラを代替するコンピュータ、幼児や老人等のIT弱者の見守りや介護、計測対象者に意識されないセキュリティ、外乱のない人の心理状態計測等を含め不察知計測技術の今後の応用展開を模索していく。

物理セキュリティ

情報漏洩やサイバー攻撃がニュースで取り上げられることが増えてきている。これは、我々が日常的にやり取りする情報を、盗んだり改ざんしたりしたいと思う悪意ある攻撃者が増えたことを意味し、情報の社会的・経済的価値の高まりが負の側面で見えている。Society 5.0では、さらに情報の価値が高まる。なぜなら、取り扱う情報が個人のプライバシーや財産に深く関わるもの、自動運転等のアクチュエーション情報は人命にも関わるものになるからである。そこで、重要になるのが情報セキュリティである。ウイルス対策ソフトウェアをはじめとするネットワークセキュリティも重要だが、最終的に全てのソフトウェアを実行するのは集積回路であり、このハードウェアへの物理的な攻撃が問題である。例えば、回路から漏れる電磁波や消費電力から情報を盗む攻撃や、回路にレーザーや電磁波を照射して情報を改ざんする攻撃が近年脅威となっている。電子戦と呼ばれる現在の戦場でも使われる技術が、残念なことに近年の計測とコンピュータ技術の進歩により、民間人でも安価に攻撃装置が手に入りやすくなり、一般社会にも物理攻撃の脅威が及んでいる。Society 5.0において安心・安全なアクチュエーションを実現するには、物理攻撃にも対処できる高度な物理セキュリティ技術が不可欠である。そこで、当研究室では、物理攻撃にも対処できる情報セキュリティ技術を研究している。具体的には、知的センサ技術を応用し、物理攻撃そのものをハードウェアの集積回路側で検知する物理攻撃センサを世界に先駆けて開発した。

図3は、暗号回路に対する電磁波解析攻撃を検知するセンサのプロトタイプである⁴⁾。電磁波解析攻撃は、ICに集積されている暗号回路の直上まで電磁プローブを接近させることで、暗号回路内部の



図3 開発した電磁波解析攻撃センサの実験セットアップ

処理と相関する漏洩電磁波を取得し秘密情報を盗み出す。このセンサでは、暗号回路周辺にコイルを備えた発振器を搭載し、コイルが発生する磁場で暗号回路を取り囲む。攻撃のための電磁プローブの接近は、この磁場を乱すため、攻撃による磁場に対する外乱が最終的に発振周波数の変化となり攻撃を検知できる。また、図4は、暗号回路に対するレーザー照射攻撃を検知するセンサのプロトタイプである⁵⁾。レーザー照射攻撃では、暗号回路に高出力のレーザーを照射することで、一時的な誤動作を挿入し、正常動作時と誤動作時の出力結果を比較することで、内部処理を逆算して秘密情報を盗み出す。レーザーの光エネルギーが電気エネルギーに変換される光電効果を利用している。このセンサでは、光エネルギーを検知するのではなく、変換された電気エネルギーの中でも回路動作にとって誤動作に繋がる成分の強度を測定して攻撃検知を行っている。

この物理セキュリティ技術で重要なことは、検知後の対処法にあり、近年の興味深い研究テーマである。もっとも一般的には、攻撃検知後に即座に暗号回路を停止する方法がある。当研究室では、単純に暗号回路を停止するのではなく、残留している内部状態を抹消するために、電源電荷を内部回路で放電する一括コード消去回路を開発した⁵⁾。また、これよりもさらにセキュリティ耐性の高い方法として、検知後即座に内部回路で高電圧を発生し、暗号回路を永久的に停止させる自己破壊回路も開発した⁶⁾。一般的に統計的な処理を必要とする解析攻撃を初回の攻撃で無効化することができる。ただし、この二つの対処法では、暗号回路がいずれも停止してしまうため、可用性の観点では問題が残る。そこで近年では、セキュリティ耐性を維持しつつ「やなぎ」の

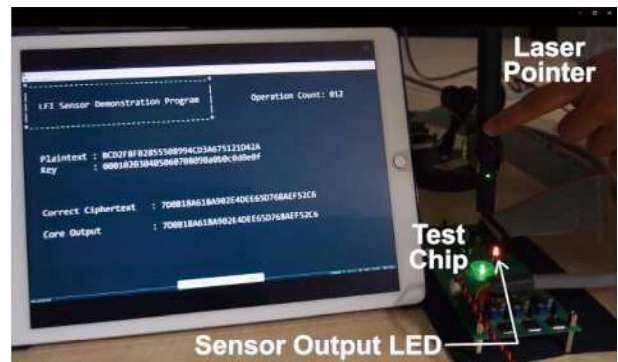


図4 開発したレーザー照射攻撃センサの実験セットアップ

ように攻撃をやり過ぎずレジリエント暗号システムを研究しており、世界中のセキュリティ技術者らと研究を推進している。例えば、検知後に鍵を更新し、暗号回路を停止することなく処理を継続する技術を開発している⁷⁾。今後は、この技術を人工知能と組み合わせ、さらに堅牢なセキュリティシステムへと高度化する。

おわりに

本稿では、Society 5.0を指向した「知的集積システム」を構築するための三つのコア技術について、筆者の研究室における取組を紹介した。知的センサ技術にとって重要なことは、価値ある情報を特定し、それを効率よく収集するためのハードウェアとソフトウェアの協調設計にある。新原理エッジコンピュータ技術の開発には、既存の枠組みにとらわれないコンピュータの新しいカタチについての自由な発想が重要である。物理セキュリティ技術の分野では、技術の進展の陰で日々生み出されている新しい物理攻撃に適切に対処する対策技術の合理的な組み合わせと運用方法が求められている。いずれの技術についても進化を続けている人工知能技術を効果的に適用し、「知的集積システム」として統合することで、社会問題を解決する一助となると信じている。

参考文献

- 1) G. E. Moore, "Cramming More Components onto Integrated Circuits," *Electronics*, vol. 38, no. 8, pp. 114, (1965)
- 2) N. Miura, S. Dosho, H. Tezuka, T. Miki, D. Fujimoto, T. Kiriyama, and M. Nagata, "A 1 mm Pitch 80x80 Channel 322 Hz Frame-Rate

- Multitouch Distribution Sensor with Two-Step Dual-Mode Capacitance Scan," IEEE Journal of Solid-State Circuits (JSSC), Vol. 50, No. 11, pp. 2741-2749, (2015)
- 3) N. Miura, S. Liu, T. Watanabe, S. Imai, and M. Nagata, "A Permanent Digital Archive System Based on $4F^2$ X-Point Multi-Layer Metal Nano-Dot Structure," IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC) Digest of Technical Papers, pp. 270-271, (2017)
 - 4) N. Miura, D. Fujimoto, D. Tanaka, Y. Hayashi, N. Homma, T. Aoki, and M. Nagata, "A Local EM-Analysis Attack Resistant Cryptographic Engine with Fully-Digital Oscillator-Based Tamper-Access Sensor," IEEE Symposium on VLSI Circuits Digest of Technical Papers, pp. 172-173, (2014)
 - 5) K. Matsuda, T. Fujii, N. Shoji, T. Sugawara, K. Sakiyama, Y. Hayashi, M. Nagata, and N. Miura, "A $286 F^2/\text{Cell}$ Distributed Bulk-Current Sensor and Secure Flush Code Eraser Against Laser Fault Injection Attack on Cryptographic Processor," IEEE Journal of Solid-State Circuits (JSSC), Vol. 53, No. 11, pp. 3174-3182, (2018)
 - 6) S. Tada, Y. Yamashita, K. Matsuda, M. Nagata, K. Sakiyama, and N. Miura, "Design and Concept Proof of an Inductive Impulse Self-Destructor in Sense-and-React Countermeasure Against Physical Attacks," Japanese Journal of Applied Physics (JJAP), vol. 60, no. SB, pp. SBBL01_1-8, (2021)
 - 7) K. Matsuda, S. Tada, M. Nagata, Y. Komano, Y. Li, T. Sugawara, M. Iwamoto, K. Ohta, K. Sakiyama, and N. Miura, "An IC-Level Countermeasure Against Laser Fault Injection Attack by Information Leakage Sensing Based on Laser-Induced Opto-Electric Bulk Current Density," Japanese Journal of Applied Physics (JJAP), vol. 59, SGGL02, pp.1-12, (2020)

