



圧縮センシングを用いた 省電力無線センサーシステム

バッテリーレスセンシングへの挑戦

大阪大学 兼本 大輔

● はじめに

近年、デジタルツインやDX (Digital Transformation)、サイバーフィジカルシステムといった次世代の情報基盤技術が急速に整備されつつある。これらの技術を支えるためには、物理空間の情報を効率的にサイバー空間へ伝達するセンサーシステムが不可欠であり、その重要性は今後さらに高まると考えられる。

特に、取得データを無線で効率よく伝送する無線センサーシステムは、ヘルスケアやインフラ監視など幅広い分野で欠かせない。例えば、脳波や心電図といったデータを無線で伝送することで、装着者から離れた場所でも生体信号の記録や解析など、生体データの活用が可能となる。これにより、ヘルスケア分野におけるモニタリングの効率が向上するだけでなく、機械やコンピュータ制御への応用をはじめ、ロボティクスやヒューマンインターフェース分野における生体信号の新たな活用も期待されている。また、工場のモーターや橋・道路に取得データの無線伝送機能を有した振動センサーが導入され、遠隔地からの構造ヘルスモニタリングが実現しつつある。さらに、地滑り検知では地中水分量センサーが活用され、広範囲にわたる異常な変化を早期に捉えるシステムの開発も進んでいる。

しかし、こうしたセンサーシステムの普及には依然として電力供給に関する課題が残る。例えば、生体信号の長

時間モニタリングにおいて、既存のシステムでは電力消費が大きく、頻繁なバッテリー交換が必要となるため、利用者の負担が増大する。加えて、長時間の動作を維持するにはバッテリーの大型化が避けられず、デバイスのウェアラブル化が困難になる。さらに、インフラや自然環境を監視するセンサーでは、広範囲かつ過酷な環境下での動作が求められるため、電力供給手法が持続的なセンシングにおける大きな課題となっている。

これらの課題を解決するには、センサーシステムの省電力化やバッテリーレス動作が不可欠である。特に、周囲の環境からエネルギーを回収（エナジーハーベスティング）し、システム動作に利用する技術は、持続的なセンサーシステムを実現する上で重要である。しかし一般的なエナジーハーベスターからは僅かなエネルギーしか回収できないため、そのエネルギーで動作する無線センサーシステムの機能や用途は限られてしまう。したがって、無線センサーシステムの課題を根本的に解決するために、従来の技術を超える革新的な省電力化技術の確立が求められる。

そこで近年、回路設計と信号処理を協調して最適化するアプローチが注目されている。中でも、信号の取得と同時にデータを圧縮する「圧縮センシング (Compressed Sensing)」⁽¹⁾は、大幅な省電力化と高精度なデータ再構成の両立が可能な手法として特に期待されており、著者を含む多くの研究者が圧

縮センシングを活用した新たな省電力無線センサーシステムの開発に取り組んでいる。

本稿では、無線脳波伝送システムを想定し、圧縮センシングを活用した省電力化技術およびバッテリーレス動作に関する実証実験について述べる。

なお、本稿は書籍⁽²⁾の兼本執筆箇所を基に加筆・修正を加え、コンパクトにまとめたものである。

● 圧縮センシング数理の基礎

圧縮センシングとは、センシング対象の信号が持つスパース性（ほとんどの情報がゼロであるという性質）を利用して、限られた取得データから元の信号を再構成する手法である。この技術をセンサーシステムに適用すれば、取得データ量を抑え、回路の省電力化が実現できる。本章では、圧縮センシングの基本的な数理に関して説明を行う。

まず、対象信号の特徴について説明する。図1は、 Δt 秒ごとの時間間隔に対応する信号強度を要素としたベクトル $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^N$ を示している。ここで、ベクトルの各要素の色濃度は信号の強度を表し、色が濃いほど強度が高く、白はゼロを意味する。

この信号 \mathbf{x} は、基底行列 $\Psi \in \mathbb{R}^{N \times P}$ とスパースベクトル $\mathbf{s} \in \mathbb{R}^P$ を用いて次のように表されると仮定する。

$$\mathbf{x} = \Psi \mathbf{s} \quad \dots(1)$$

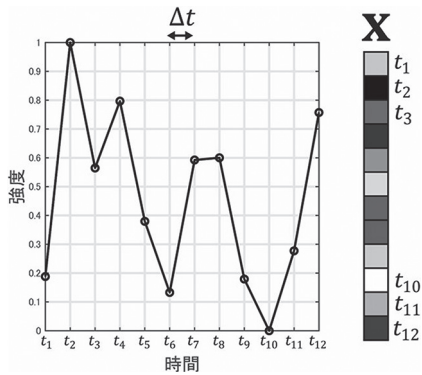


図1 Δt 秒ごとの時間間隔に対応する信号強度を要素としたベクトル \mathbf{x}

図2(a)に示す式(1)の例では、 $N=P=12$ のケースにおいて、非ゼロ要素が二つのみ存在し、高いスパース性を持つことがわかる。

確かに、すべての信号 \mathbf{x} が基底行列とスパースベクトルの積で表現できるわけではないが、例えば、周期的な信号(脳波や機械振動など)では、逆フー

リエ変換や逆離散コサイン変換⁽³⁾を基底行列として用いることで表現できることが期待される。さらに、過去に得られた既知信号を利用し、対象信号をスパースベクトルと基底行列の積として表現するスパースモデリング手法⁽⁴⁾⁽⁵⁾の研究も進んでいる。つまり、自然界に存在する単純な構造を持つ信号については式(1)が成り立つケースが多いといえる。

続いて、信号の圧縮について述べる。観測行列 $\Phi \in \mathbb{R}^{M \times N}$ を用いることで、圧縮信号 $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^M$ は次のように表される。

$$\mathbf{y} = \Phi \mathbf{x} \quad \dots(2)$$

ここで $M < N$ とすると、 \mathbf{y} の要素数は \mathbf{x} より少なくなり、データ量の削減、すなわち信号の圧縮が実現できる。図2(b)に示す例では、 $M=4$ 、つまり圧縮比(CR: Compressed Ratio) $CR = \frac{N}{M}$ が1/3になるため、データ量を1/3に圧縮

できていることを示している。

圧縮操作に比べ、圧縮信号 \mathbf{y} から元の信号 \mathbf{x} を直接再構成するのは難しい。なぜなら、 $M < N$ の場合、観測行列 Φ が横長で逆行列が存在しないためである。この問題に対処するため、圧縮センシングでは式(1)と式(2)を組み合わせ、

$$\mathbf{y} = \Phi \mathbf{x} = \Phi \Psi \mathbf{s} = \Theta \mathbf{s} \quad \dots(3)$$

という関係を導出する。ここで、センシング行列 Θ は既知であり、観測データ \mathbf{y} は未知のスパースベクトル \mathbf{s} に対する写像として表現できる(図3(a)(b))。つまり、既知の Θ と \mathbf{y} を用い、以下の最適化問題を解くことでスパースベクトル \mathbf{s} が求まる。

$$\mathbf{s} = \arg \min_{\mathbf{s}} \|\mathbf{s}\|_0 \quad \text{subject to} \quad \mathbf{y} = \Theta \mathbf{s} \quad \dots(4)$$

ここで、 $\|\cdot\|_0$ は ℓ_0 ノルムを示し、非ゼロ要素の数を示す。この最適化問題は、 $\mathbf{y} = \Theta \mathbf{s}$ という制約を満たしつつ、最もスパースなベクトル \mathbf{s} を求めることを意味する。ただし、式(4)を直接解くことはNP困難な問題に相当し、現実的な時間内で解を求めるのは難しい。そこで、式(4)の直接解法の代わりに、直交マッチング追跡(Orthogonal Matching Pursuit: OMP)⁽⁶⁾やブロックスパースベイジアン学習(Block Sparse Bayesian Learning: BSBL)⁽⁷⁾といった再構成アルゴリズムが、圧縮センシングを応用したセンシングシステムにおいて広く用いられている。

そして、最終的に得られたスパースベクトル \mathbf{s} と基底行列 Ψ を用い、対象信号 $\hat{\mathbf{x}}$ を次の関係式で再構成する。

$$\hat{\mathbf{x}} = \Psi \mathbf{s} \quad \dots(5)$$

このように、圧縮センシングはスパース性を活用し、無線センサーシステムで扱うデータ量削減と高精度な信号

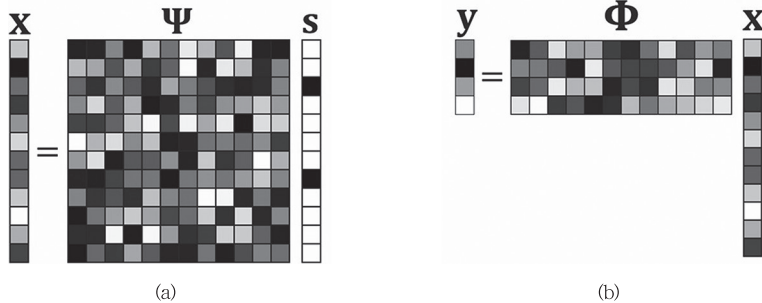


図2 (a) \mathbf{x} を基底行列 Ψ とスパースベクトル \mathbf{s} の行列ベクトル積で表現。(b)圧縮信号 \mathbf{y} は観測行列 Φ と \mathbf{x} との行列ベクトル積で生成。

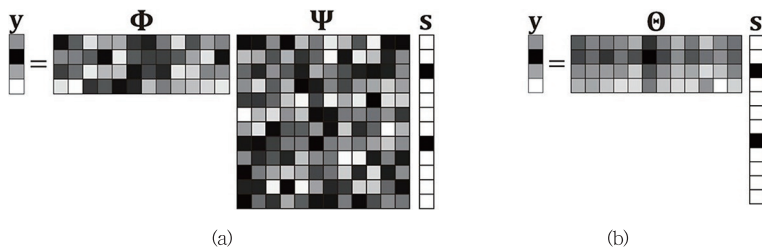


図3 (a) \mathbf{y} を Φ 、 Ψ 、 \mathbf{s} の積で表現。(b) \mathbf{y} はセンシング行列 Θ とスパースなベクトル \mathbf{s} との行列ベクトル積で表現可能。

再構成の両立を可能にする手法である。

● 圧縮センシングを活用した無線センサーシステムの概要～ランダムアンダーサンプリングを中心に～

図4は、圧縮センシングを応用した無線センサーシステムの概要図である。無線センサーシステムは、信号の取得と送信を行うセンシングユニットと、信号処理を担当するデータプロセッシングユニットで構成される。

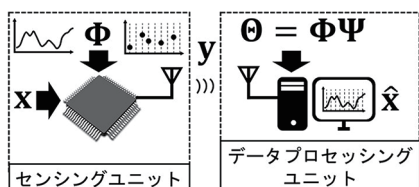


図4 圧縮センシングを活用した無線センサーシステムの概要図

一般的なセンシングユニットは、センサー、アナログ回路、A/D変換器、デジタル処理回路、および無線送信機から成る。センシングユニットでは、観測行列 Φ と入力信号 x の行列ベクトル積により圧縮信号 y が生成され、データ量が削減された状態で無線送信される。データ量の削減は無線送信時の電力消費を抑えるだけでなく、回路全体の消費電力を削減する手段としても有効である。

省電力化が求められるセンシングユニットと違い、データプロセッシングユニットは計算リソースに余裕があることが多く、複雑な信号処理が可能である。センシングユニットとデータプロセッシングユニットでは同じ観測行列 Φ が用いられるが、 Φ はセンシングユニットの実装しやすさも考慮して設計する必要がある。

観測行列としては、ランダム行列やランダムバイナリー行列、さらにはラ

ンダムアンダーサンプリング行列⁽⁸⁾が知られている。ここで「ランダム」とは言うものの、センシングユニットとデータプロセッシングユニットが同一の観測行列を共有する必要があるため、両者が再現可能な疑似ランダム行列が用いられることが一般的である。我々の研究グループでは、観測行列としてランダムアンダーサンプリング行列に注目している。この行列は、各行に1が一つだけ存在し、それ以外の要素はすべて0である。また i 行 j 列に1があった場合、 $i+1$ 行目の1は、 $j+1$ 列以降においてランダムに存在するという特徴を持つ。この行列を圧縮に用いると、入力信号ベクトル x の要素を疑似ランダムに選択し、圧縮信号 y を生成することに相当する。つまり、特別な信号処理の追加を必要とせず、A/D変換器のサンプリングタイミングを制御し、ランダムかつ間欠的なサンプリング（以降、ランダムアンダーサンプリングと呼ぶ）を行うだけで行列ベクトル積を実現できる。そのため、ランダムアンダーサンプリング行列は回路実装の点で優れており、我々は様々なセンサーシステムへ応用することで、ランダムアンダーサンプリングの有効性を確認している（例えば^{(9)~(16)}）。

次に、従来の等間隔サンプリングと

ランダムアンダーサンプリングにおける動作の違い、およびそれぞれの電力消費について図5を用いて説明する。図5(a)は従来の等間隔サンプリングにおけるA/D変換器のサンプリング動作と消費電力を示している。等間隔サンプリングでは、膨大なデータを無線送信する必要があり、無線通信の電力消費が大きくなる。また、サンプリング回数が増えると回路の動作頻度が高まり、消費電力の削減はさらに困難になる。一方、図5(b)はランダムアンダーサンプリングを採用した場合を示している。この手法では、サンプリングを間引くことでデータ量が削減され、無線通信にかかる電力消費を抑制できる。加えて、A/D変換器の間欠動作により回路の動作回数が減少し、サンプリングに伴う消費電力も抑えられる。

● 省電力化によるバッテリーレス動作への挑戦～無線脳波伝送事例～

我々はこれまでに、脳波や心電図、内視鏡画像⁽¹⁷⁾、超音波エコー画像⁽¹⁸⁾の取得に圧縮センシングを適用したシステムを研究し、省電力化に関する有効性を示してきた。本稿では特に、ランダムアンダーサンプリングを用いた圧縮センシングによる無線脳波伝送シス

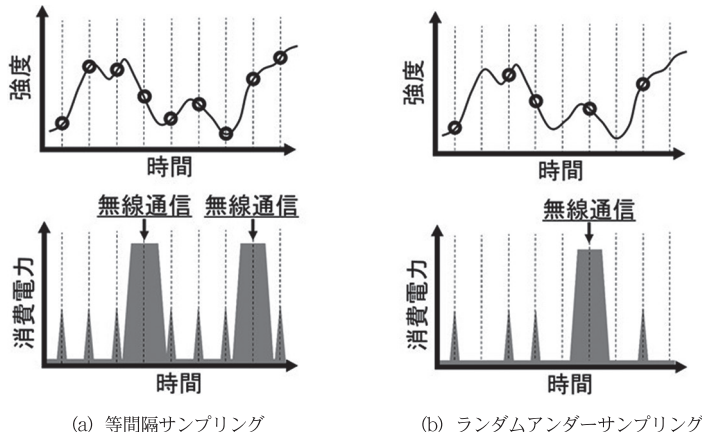


図5 従来の等間隔サンプリングとランダムアンダーサンプリングの違い

テムの検証実験⁽¹⁹⁾を取り上げ、省電力効果とバッテリーレス動作について解説する。

本実験では、A/D変換器と送信機を搭載したマイコン（Nordic Semiconductor nRF52840）をセンシングユニットとして使用し、ランダムアンダーサンプリング行列 Φ に基づく間欠動作を実装することで信号圧縮を行った。センシングユニットで生成された圧縮信号は、約1 m離れたデータプロセッシングユニットに無線で伝送され、消費電力の削減効果と信号再構成の精度について確認した。省電力動作を確認後、CUI Devices製の4 cm角の小型熱電発電素子CP85438を収納箱に入れ、無風状態で2度の温度差を与え、その際に得られたエネルギーのみを電源としてシステムを動作させることに挑戦した。なお、2度は体温36度と外気温26度を仮定した場合の、熱抵抗などを考慮して算出した温度差を想定している。

図6は本実験に用いたシステムのブロック図、図7は実験環境を示す写真である。送信側のデバイスは、マイコンと電源回路から成るセンシングユニット、受信側はマイコンとノートPCで構成されるデータプロセッシングユニットである。通常、センシングユニットには電極やアナログアンプ、フィルタがA/D変換器の前段に配置されるが、本実験ではランダムアンダーサンプリングを活用した圧縮センシングの有効性を検証することを目的とし、A/D変換器以降の動作確認を行った。本実証では、あらかじめ取得した脳波信号を信号発生器（NI PXIe-4463）で出力し、センシングユニットのマイコンへ入力した。用いた信号は国際10-20法のFP1-A1電極配置から得たもので、A/D変換器のフルスケールに合わせて振幅を調整して使用した。サンプリング周波数は256 Hz、1セグメントの信号長は3.125秒とし、ベクトル長は $N=800$

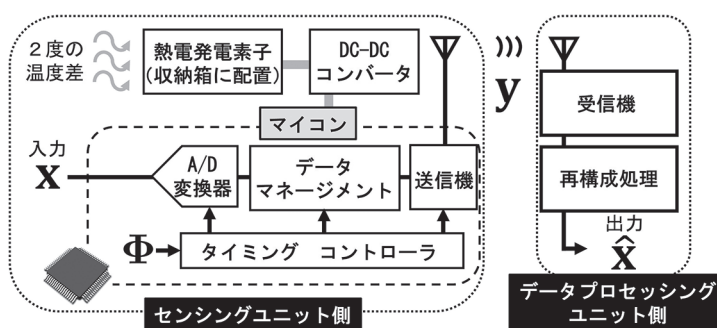
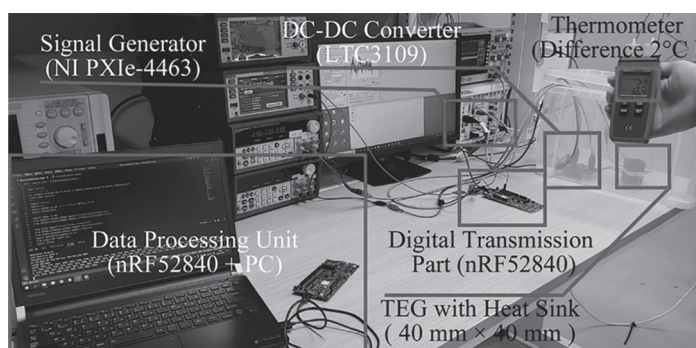


図6 本実験で用いた圧縮センシングを活用した回路システム



©2023 IEEE

図7 ランダムアンダーサンプリングを採用したバッテリーレスシステムの検証実験
(出典：写真は(19)より引用)

とした。

本実証では、ランダムアンダーサンプリングによりサンプリングを間引くことで、マイコンのデータレートを等価的に1/4に低減し、4倍圧縮 ($CR=4$) を実現している。電源には、外部直流電源（KEITHLEY 2230J-30-1）と熱電発電素子による電力供給の二つのパスをそれぞれ実装し、双方の実証実験が可能な構成を採用した。熱電発電素子は外部の温度差によって微小な電圧を発生するため、DC-DCコンバータ（Analog Devices LTC3109）を用いて3.3 Vに昇圧し、マイコンの電源として利用した。

圧縮信号はマイコンでパケット化され、Bluetooth Low Energy 5.0を介して無線送信された。受信側のデータプロセッシングユニットでは、送信側と

同じマイコン（nRF52840）でデータを受信し、ノートPCへ伝送した。再構成処理にはOMPアルゴリズムを用い、Python3で実装したプログラムをノートPC上で実行した。

図8に外部直流電源に接続した場合の消費電力比較を示す。A/D変換およびデジタル処理の消費電力（A/D変換+デジタル）と無線送信回路の消費電力をそれぞれ示した。上段は従来の等間隔256 Hzサンプリングの場合を、下段はランダムアンダーサンプリングを用いた場合の結果を示している。実証実験の結果、ランダムアンダーサンプリングによる4倍圧縮では、消費電力を345 μ Wから97 μ Wへ、72%削減が可能であることが確認された。つまり本結果より、熱電発電素子から得られた僅かなエネルギーでもシステム

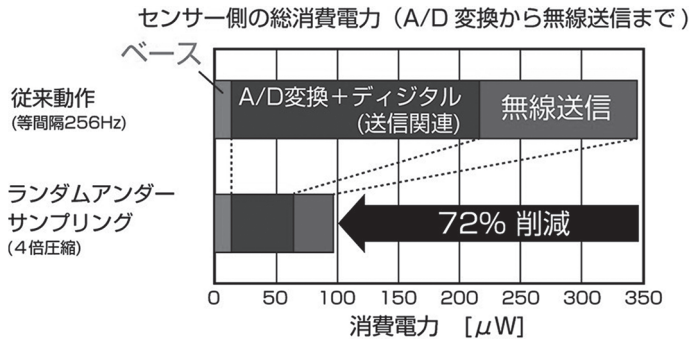


図8 等間隔サンプリングとランダムアンダーサンプリングの電力比較
4倍圧縮によりA/D変換回数の削減と送信データ量を抑えることができ、消費電力72%削減を達成。

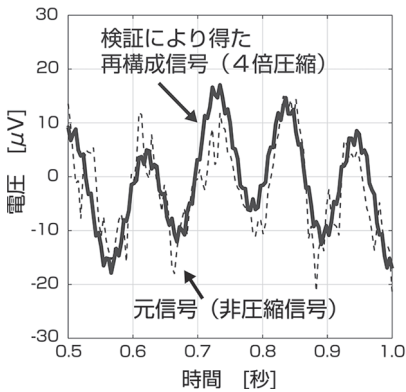


図9 熱電発電素子を活用したバッテリーレスシステムによって得られた再構成信号
(2度の温度差、4倍圧縮・再構成)

動作が期待できることが分かった。

図9は熱電発電素子を電源として利用し、バッテリーレス動作を行った場合における、元信号と再構成された脳波信号の波形を示している。再構成信号は元信号に近い波形を保持しており、4倍圧縮後でも十分な再現性が得られていることが分かる。以上の結果から、4 cm角の小型熱電発電素子に2度の温度差を与えて得られる微小な電力のみでも無線脳波伝送システムが動作可能であることを、実機で証明することができた。

おわりに

本稿では、圧縮センシングを用いた省電力センシングシステムについて解

説し、省電力化によりバッテリーレス動作を実現した事例を紹介した。まず、圧縮センシングの数理的な基本概念を説明し、信号圧縮に不可欠な観測行列や、センサーデバイスに搭載するセンシングユニットの実装方法についてまとめた。次に、具体例として省電力・バッテリーレス動作が可能な無線脳波伝送システムについて解説した。本稿で述べた内容が、圧縮センシングを活用した省電力センサーシステムの研究および開発の一助となることを期待する。

参考

以下にて、我々の研究活動に関する情報を公開中である。

- 【Web】 <http://ssc.eei.eng.osaka-u.ac.jp/~dkanemoto/>
- 【研究紹介ポスター】 http://ssc.eei.eng.osaka-u.ac.jp/~dkanemoto/PR_materials/IJ2024_DK_240911_HIGH_RES_VERSION.pdf
- 【X】 (@DaisukeKanemoto) <https://x.com/daisukekanemoto>
- 【YouTube】 https://www.youtube.com/@KANEMOTO_GIKEN

【謝辞】

本稿で解説した研究はJSPS科研費JP23K18463およびJP24K02914の助成を受けたものです。また一部は(国研

新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成事業(JPNP20004)の結果得られたものです。

【参考文献】

- (1) D. L. Donoho: "Compressed sensing", *IEEE Trans. Inf. Theory*, Vol.52, No.4, pp.1289-1306 (Apr. 2006)
- (2) 兼本大輔を含む多数、生体センシング技術の開発とヘルスケア、遠隔診断への応用、技術情報協会(2024年4月)
- (3) Z. Zhang, T.-P. Jung, S. Makeig, and B. D. Rao: "Compressed Sensing of EEG for Wireless Telemonitoring With Low Energy Consumption and Inexpensive Hardware", *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, Vol.60, No.1, pp.221-224 (Jan. 2013)
- (4) K. Nagai, D. Kanemoto, and M. Ohki: "Applying K-SVD Dictionary Learning for EEG Compressed Sensing Framework with Outlier Detection and Independent Component Analysis", *IEICE Trans. Fundamentals*, Vol.E104-A, No.9, pp.1375-1378 (Sep. 2021)
- (5) D. Kanemoto, and T. Hirose: "EEG Measurements with Compressed Sensing Utilizing EEG Signals as the Basis Matrix", in *Proc. IEEE Int. Symp. Circuits Syst. (ISCAS)*, pp. 1-5 (May 2023)
- (6) J. A. Tropp and A. C. Gilbert: "Signal Recovery From Random Measurements Via Orthogonal Matching Pursuit", *IEEE Trans. Inf. Theory*, Vol. 53, No.12, pp.4655-4666 (Dec. 2007)
- (7) Z. Zhang, and B. D. Rao: "Extension of SBL Algorithms for the Recovery of Block Sparse Signals With Intra-Block Correlation", *IEEE Trans. Signal Process.*, Vol.61, No.8, pp.2009-2015 (Apr. 2013)
- (8) Y. Okabe, D. Kanemoto, O. Maida, and T. Hirose: "Compressed Sensing EEG Measurement Technique with Normally Distributed Sampling Series", *IEICE Trans. Fundamentals*, Vol.E105-A, No.10, pp.1429-1433 (Oct. 2022)
- (9) S. Katsumata, D. Kanemoto, and M. Ohki: "Applying Outlier Detection and Independent Component Analysis for Compressed Sensing EEG Measurement Framework", in *Proc. IEEE Biomed. Circuits Syst. Conf. (BioCAS)*, pp.1-4 (Oct. 2019)
- (10) D. Kanemoto, S. Katsumata, M. Aihara, and M. Ohki: "Compressed Sensing Framework Applying Independent Component Analysis after Undersampling for Reconstructing Electroencephalogram Signals", *IEICE Trans. Fundamentals*, Vol.E103-A, No.12, pp.1647-1654 (Dec. 2020)
- (11) T. Miyata, D. Kanemoto, and T. Hirose: "Utilizing Previously Acquired BSBL Algorithm Parameters in the Compressed Sensing Framework for EEG Measurements", in *Proc. IEEE Int. Conf. Consum. Electron. (ICCE)*, pp.1-5 (Jan. 2024)
- (12) R. Tsunaga, D. Kanemoto, and T. Hirose: "Noise-Masking Cryptosystem Using Watermark

- and Chain Generation for EEG Measurement with Compressed Sensing”, in *Proc. IEEE Int. Conf. Consum. Electron. (ICCE)*, pp.1-6 (Jan. 2024)
- (13) K. Mii, D. Kanemoto, and T. Hirose : “0.36 μ W/channel Capacitively-coupled Chopper Instrumentation Amplifier in EEG Recording Wearable Devices for Compressed Sensing Framework”, *Jpn. J. Appl. Phys.* 63, 03SP54 (2024)
- (14) R. Matsubara, D. Kanemoto, and T. Hirose : “Reducing Power Consumption in LNA by Utilizing EEG Signals as Basis Matrix in Compressed Sensing”, in *Proc. IEEE Int. Symp. Circuits Syst. (ISCAS)*, pp.1-5 (May 2024)
- (15) T. Yamamoto, D. Kanemoto, and T. Hirose : “Noise-Masking Cryptosystem Using Watermark and Chain Generation for EEG Measurement with Compressed Sensing”, in *Proc. IEEE Int. Conf. Consum. Electron. (ICCE)* (in press) (Jan. 2025)
- (16) R. Matsubara, D. Kanemoto, and T. Hirose : “Design Guidelines for Noise in a Low-Noise Amplifier Using EEG Signals as a Basis Matrix in Compressed Sensing System”, in *Proc. IEEE Int. Conf. Consum. Electron. (ICCE)* (in press) (Jan. 2025)
- (17) Y. Harada, D. Kanemoto, T. Inoue, O. Maida, and T. Hirose : “Image Quality Improvement for Capsule Endoscopy Based on Compressed Sensing with K-SVD Dictionary Learning”, *IEICE Trans. Fundamentals*, Vol.E105-A, No.4, pp.743-747 (Apr. 2022)
- (18) D. Kanemoto, J. Spaulding, and B. Murmann : “Single-chip Mixer-based Subarray Beamformer for Sub-Nyquist Sampling in Ultrasound Imaging”, *Jpn. J. Appl. Phys.* 60, SBBL08 (Apr. 2021)
- (19) T. Miyata, D. Kanemoto, and T. Hirose : “Random Undersampling Wireless EEG Measurement Device Using a Small TEG”, in *Proc. IEEE Int. Symp. Circuits Syst. (ISCAS)*, pp.1-5 (May 2023)

筆者紹介

兼本大輔

大阪大学
工学研究科
准教授

<主なる業務歴
及び資格>

- 専門：集積回路
設計・システム実装・信号処理
- 研究：ソフトウェアとハードウェア
の協調設計による省電力センシング
システムの実現

