

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：14401  
研究種目：基盤研究(B)（一般）  
研究期間：2021～2023  
課題番号：21H03410  
研究課題名（和文）間引きサンプリング法で切り拓く，圧縮センシングによる脳波計測回路システムの新展開  
  
研究課題名（英文）Development of EEG Measurement Circuit System by Compressed Sensing Using Random Sampling  
  
研究代表者  
兼本 大輔（Kanemoto, Daisuke）  
  
大阪大学・大学院工学研究科・准教授  
  
研究者番号：90603332  
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：省電力無線脳波計測回路システム実現のための，間引きサンプリング動作に適したハードウェア・ソフトウェア設計技術を提案した．具体的には，間引きサンプリング動作を想定した集積回路構成および動作機構，新しい圧縮センシングの復元アルゴリズム，またセキュアな通信システムを実現するための技術を提案し，有効性を議論した．

研究成果の学術的意義や社会的意義  
間引きサンプリングを活用した無線脳波計測システムのための新技術を提案し，理論検討・実機検証を通して新技術の有効性を示すことができた．得られた研究成果は，計算機システムや情報関連分野の新技術発見における学術的意義だけでなく，圧縮センシングを活用した省電力無線脳波計の可能性を広げられた点に社会的意義も有する．

研究成果の概要（英文）：Hardware and software design techniques suitable for random sampling operations to realize a low-power wireless EEG measurement circuit system were proposed. Specifically, integrated circuit configurations and their operations designed for random sampling, new reconstruction algorithms for compressed sensing, and secure communication system were proposed, and their effectiveness was discussed.

研究分野：回路とシステム

キーワード：圧縮センシング 回路とシステム 集積回路

1. 研究開始当初の背景

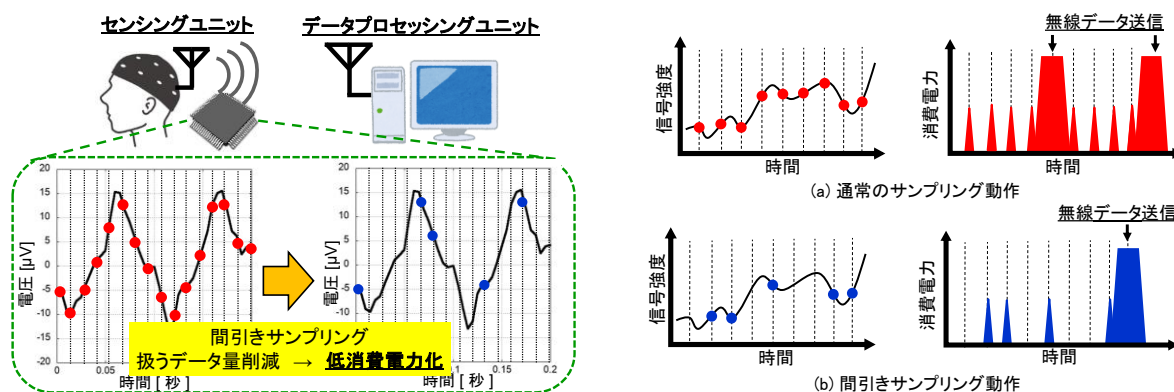


図 1:間引きサンプリングの活用

本格的な IoT 社会の到来に向け、軽量バッテリーで長時間動作が可能な生体信号計測ウェアラブルデバイスの実現が求められている。中でも、脳波を計測する軽量ウェアラブルデバイスの実現は、「コンピュータと人間を結ぶブレインマシンインタフェース」や「精神・神経疾患の発見」などへの応用が期待できるため、多くの学術分野への波及効果に注目が集まっている。

上記の背景を踏まえ、脳波計測ウェアラブルデバイスに搭載する回路の省電力化が重要な課題となっている。そこで、信号を圧縮しながら取得する圧縮センシングの応用研究が進んでいる。圧縮センシングを脳波計測システムに応用した場合、センシングユニットで扱う情報量を抑えつつ、データプロセッシングユニットでの演算で元の波形に近い脳波信号が得られるため、ウェアラブルデバイスの省電力化が期待できる。

研究代表者は、圧縮センシングをウェアラブルデバイス回路システムへ実装する手法の一つとして、回路の動作回数自体を削減することで省電力化を実現する間引きサンプリングに関する研究を行っている(図 1)。本手法は、従来の圧縮センシングの手法で用いられる、センシングユニットにおける複雑なアナログもしくはデジタル信号処理が不要であり、サンプリングタイミングを間引くだけで、原理的には実装可能である。ただし、間引きサンプリングのメリットを活かした回路システム実現方法は明らかになっていない。

2. 研究の目的

間引きサンプリングを行う回路システムは、一般的なセンシング回路システムに比べ、回路構成から信号処理方法まで大きく異なる。そこで本研究では、間引きサンプリングに適した回路システム実現法の解明およびそれらを統合した新しいシステムの有効性検討を目的に実施した。具体的には、間引きサンプリングに適した集積回路構成法の解明のみならず、間引きサンプリングに適したセンシングフレームワーク(復元・通信方法)を提案し、間引きサンプリングを活用した脳波計測ウェアラブルデバイスのための技術提案を目指した。

3. 研究の方法

本研究では集積回路から復元アルゴリズムまでを総合的に検討し、間引きサンプリングに適した技術を提案した。また各種提案技術を統合し、間引きサンプリングを活用したシステムの評価も行った。本報告書では、以下の3点に絞って解説を行う。

- (1) ガウス分布に従うサンプリングパターンを採用した間引きサンプリング
- (2) 圧縮センシングの特徴を活かした低雑音アンプ(LNA)
- (3) 間引きサンプリングを採用した脳波伝送システムの実装及びその有効性確認

上記以外に、高速復元手法やセキュア通信方式等の研究成果も得られている。詳細は論文[1]-[5]を参考にされたい。

#### 4. 研究成果

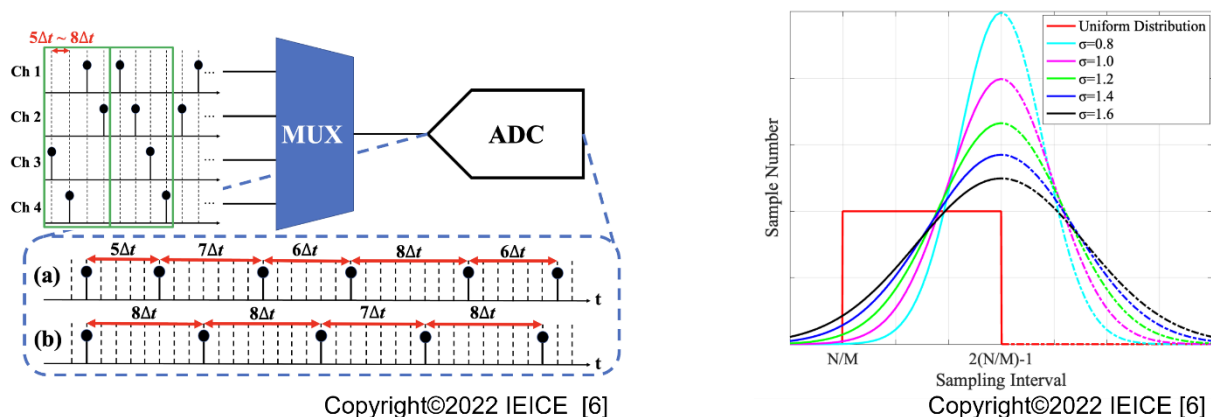
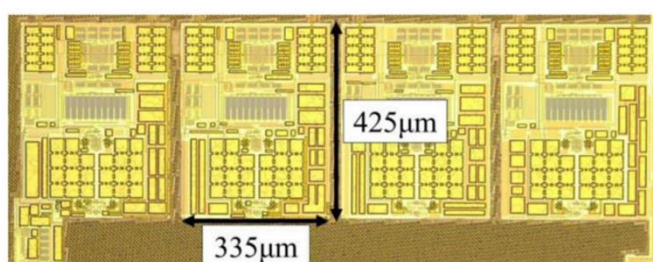
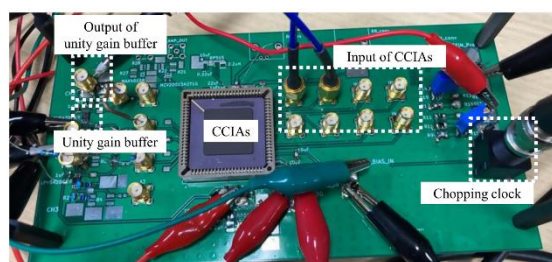


図 2: (左) サンプル間隔の制約有無 (a) 制約無 (b) 制約有, (右) ガウス分布に従った間隔分布



Reproduced from ref.[7]



Reproduced from ref.[7]

図 3: (左) 作成した LNA 集積回路, (右) 測定環境

##### (1) ガウス分布に従うサンプリングパターンを採用した間引きサンプリング

間引きサンプリングを圧縮センシングのシステムで実現するには、サンプリングパターンの最適化が重要になる。例えば、サンプリングパターンの幅を一様分布で設計する場合、A/D 変換器などの回路仕様は、最も間隔が短いケースに合わせた設計が必要になる。つまり、設計に求められる仕様条件が高くなるため、間引きサンプリングのメリットが活かしにくくなる。

そこで本課題では、サンプリング間隔に制限を設け、回路の省電力化が可能な手法を検討した (図 2 左)。具体的には狭い間隔のサンプリングを避けるために、ガウス分布を採用したサンプリングパターン生成法を提案し、間隔を広げつつも復元精度の確保を可能にした (図 2 右)。

##### (2) 圧縮センシングの特徴を活用した LNA

圧縮センシングシステムでの復元操作に着目した、低消費電力 LNA を開発した。周波数基底を使った復元操作では、周波数領域でのスパース性低下の原因となるフリッカ雑音低減が、復元精度改善に重要である。そこで、周波数領域における信号のスパース性を保ちつつ、消費電力を大幅に抑えた LNA を設計し、その有効性の確認を行った。

この LNA は、容量結合チョッパー計装増幅器 (CCIA) アーキテクチャを採用し、フリッカ雑音の低減を実現した。作成した LNA (図 3 左) を評価した結果、消費電力  $0.36 \mu\text{W}/\text{ch}$ 、入力参照雑音が  $4.47 \mu\text{V}_{\text{rms}}$  であった。本結果を用いて、作成した LNA をシステムで利用する際の評価を行った (図 3 右)。サンプリング方法は間引きサンプリングを使用した。評価の結果、4 倍圧縮において、雑音の有無に対する正規化平均二乗誤差は、非圧縮状態との差に比べ、0.008 に抑えられることが分かった。

以上の結果から、低消費電力に特化した LNA を実装しても、周波数領域における脳波信号のスパース性を利用すれば、間引きサンプリングを活用した圧縮センシングフレームワークにおいて、雑音による信号劣化が抑えられることが分かった。

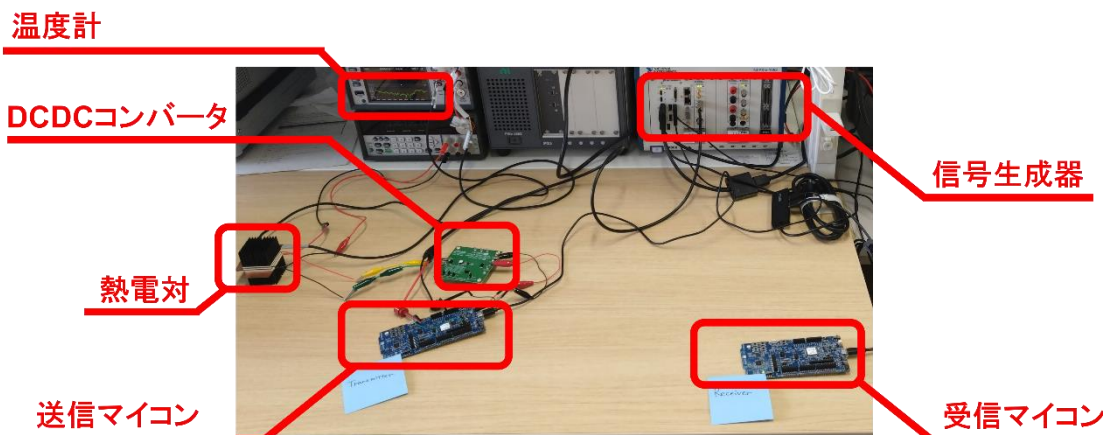


図 4: 間引きサンプリングを活用した脳波伝送実験

### (3) 間引きサンプリングを採用した脳波伝送システムの実装及びその有効性確認

本研究では、間引きサンプリングを利用した脳波伝送システムを実機で作成し、提案手法の有効性を確認した。圧縮方法として間引きサンプリングを採用し、復元アルゴリズムはOMPを活用した。システム評価にはFP1-A1の脳波信号を用いた。4倍圧縮実験の結果、マイコンの電力を $345\mu\text{W}$ から $97\mu\text{W}$ に削減することを実機で確認することができた(図4)。

さらに、省電力化のメリットを確認するために、電源として $40\text{mm}\times 40\text{mm}$ の小型熱電発電機(TEG)のみを用いた無線脳波伝送システムを提案・実装した。本実験では僅かな温度差をTEGに与え、発電により得られたエネルギーを使うことで、バッテリーレス動作を確認した。得られた波形は、正規化平均二乗誤差を0.24程度に抑えられ、大幅な劣化を避けつつも信号復元が可能であることが分かった。

#### 【文献】

- [1] 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)*, May 2024. pp.1-5.
- [2] 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)*, Jan. 2024, pp.1-5.
- [3] 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)*, Jan. 2024, pp.1-6.
- [4] **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)*, May 2023. pp.1-5.
- [5] 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)*, May 2023. pp.1-5.
- [6] 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.
- [7] K. Mii, **D. Kanemoto**, and T. Hirose, "0.36 $\mu\text{W}$ /channel Capacitively-coupled Chopper Instrumentation Amplifier in EEG Recording Wearable Devices for Compressed Sensing Framework," *Jpn. J. Appl. Phys.* 63, 03SP54, 2024.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Yuki Okabe, Daisuke Kanemoto, Osamu Maida, and Tetsuya Hirose	4. 巻 E105-A
2. 論文標題 Compressed Sensing EEG Measurement Technique with Normally Distributed Sampling Series	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 1429 ~ 1433
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transfun.2021EAL2099	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Kenji Mii, Daisuke Kanemoto, and Tetsuya Hirose	4. 巻 63
2. 論文標題 Low quiescent current LDO with FVF-based PSRR enhanced circuit for EEG recording wearable devices	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 03SP33 ~ 03SP33
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ad1f0e	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Kenji Mii, Daisuke Kanemoto, and Tetsuya Hirose	4. 巻 63
2. 論文標題 0.36 $\mu$ W/channel capacitively-coupled chopper instrumentation amplifier in EEG recording wearable devices for compressed sensing framework	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 03SP54 ~ 03SP54
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ad264f	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計18件（うち招待講演 1件／うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Daisuke Kanemoto, and Tetsuya Hirose
2. 発表標題 EEG Measurements with Compressed Sensing Utilizing EEG Signals As the Basis Matrix
3. 学会等名 IEEE Int. Symp. Circuits Syst. (ISCAS) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takuya Miyata, Daisuke Kanemoto, and Tetsuya Hirose
2. 発表標題 Random Undersampling Wireless EEG Measurement Device Using a Small TEG
3. 学会等名 IEEE Int. Symp. Circuits Syst. (ISCAS) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 原田勇輝, 兼本大輔, 廣瀬哲也
2. 発表標題 脳波を用いた感情認識システムにおける無線送信データ削減手法および実装に関する検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 電子情報通信学会技術研究報告
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西川晃弘, 兼本大輔, 三井健司, 廣瀬哲也
2. 発表標題 FVFを利用したリップル電圧の基本波・高調波成分除去が可能な低消費電力LDO
3. 学会等名 電子情報通信学会 総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 津永亮多, 兼本大輔, 永井孝太郎, 廣瀬哲也
2. 発表標題 圧縮センシングを用いた脳波計測フレームの電子すかし暗号システムにおける DoS 攻撃耐性について
3. 学会等名 電子情報通信学会 総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡部勇樹, 兼本大輔, 廣瀬哲也
2. 発表標題 圧縮センシングを用いた低消費電力脳波計測フレームワークにおけるサンプリング系列比較
3. 学会等名 電子情報通信学会 総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 永井孝太郎, 兼本大輔, 廣瀬哲也, 大木 真
2. 発表標題 BSBL アルゴリズムを用いた脳波圧縮センシングに適した辞書行列の解明
3. 学会等名 電子情報通信学会 総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三井健司, 兼本大輔, 毎田 修, 廣瀬哲也
2. 発表標題 FVFを応用したPSRR帯域拡張回路を搭載した脳波計測ウェアラブルデバイス向け低消費LDO
3. 学会等名 電子情報通信学会 デザインガイア
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 兼本大輔
2. 発表標題 圧縮センシングを活用した脳波計測システム
3. 学会等名 応用物理学会 東海支部 基礎セミナー「バイオセンシング技術の進展」(招待講演)
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 Riku Matsubara, Daisuke Kanemoto, and Tetsuya Hirose
2. 発表標題 Reducing Power Consumption in LNA by Utilizing EEG Signals as Basis Matrix in Compressed Sensing
3. 学会等名 IEEE Int. Symp. Circuits Syst. (ISCAS) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Takuya Miyata, Daisuke Kanemoto, and Tetsuya Hirose
2. 発表標題 Utilizing Previously Acquired BSBL Algorithm Parameters in the Compressed Sensing Framework for EEG Measurements
3. 学会等名 IEEE Int. Conf. Consum. Electron. (ICCE) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Ryota Tsunaga, Daisuke Kanemoto, and Tetsuya Hirose
2. 発表標題 Noise-Masking Cryptosystem Using Watermark and Chain Generation for EEG Measurement with Compressed Sensing
3. 学会等名 IEEE Int. Conf. Consum. Electron. (ICCE) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Kenji Mii, Daisuke Kanemoto, and Tetsuya Hirose
2. 発表標題 Low Quiescent Current Capacitively-coupled Chopper Instrumentation Amplifier in EEG Recording Wearable Devices for Compressed Sensing Framework
3. 学会等名 Solid State Devices and Materials (SSDM) (国際学会)
4. 発表年 2023年



1. 発表者名 Kenji Mii, Daisuke Kanemoto, and Tetsuya Hirose
2. 発表標題 Low Quiescent Current LDO with FVF-Based PSRR Enhanced Circuit for EEG Recording Wearable Devices
3. 学会等名 Solid State Devices and Materials (SSDM) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 兼本大輔, 瀧本英智, 三井健司, 宮田拓弥, 廣瀬哲也
2. 発表標題 僅かな温度差で動作するバッテリーレス無線脳波計 ~ランダムアンダーサンプリングと圧縮センシングの数理を活用したLSIからシステムまで~
3. 学会等名 LSIとシステムのワークショップ 2024
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 三井健司, 兼本大輔, 廣瀬哲也
2. 発表標題 ウェアラブル脳波計実現に向けたランダムアンダーサンプリング型圧縮センシングウェアラブル脳波計測システムにおける低消費電力LNAの実測及びその解析
3. 学会等名 LSIとシステムのワークショップ 2024
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 宮田拓弥, 兼本大輔, 廣瀬哲也
2. 発表標題 復元時に得られたパラメータを再利用するBSBL アルゴリズムを活用した圧縮センシングフレームワーク
3. 学会等名 電子情報通信学会 ソサイエティ大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松原利空, 兼本大輔, 廣瀬哲也
2. 発表標題 連鎖圧縮センシングにおける脳波辞書適用による成功確率の改善
3. 学会等名 電子情報通信学会 ソサイエティ大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 安藤 健二郎, 木村 信之, 太田 進, 木下 翔太郎, 山本 達郎, 関根 嘉香, 戸羽 辰夫, 中村 昌人, 熊木 大介, 長峯 邦明, 荒川 貴博, 山岸 健人, 網盛 一郎, 太田 裕貴, 双見 京介, 兼本 大輔, 他 4 6 名	4. 発行年 2024年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 559
3. 書名 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	

〔出願〕 計4件

産業財産権の名称 信号圧縮装置、信号復元装置及び信号処理システム	発明者 兼本大輔	権利者 大阪大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2023-1730	出願年 2023年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 信号圧縮装置、信号復元装置及び信号処理システム	発明者 兼本大輔, 永井孝太郎	権利者 大阪大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-28896	出願年 2022年	国内・外国の別 外国

産業財産権の名称 定電圧回路及び電子機器	発明者 三井健司, 兼本大輔	権利者 大阪大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-193038	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 センシングデバイス、データ処理ユニット及びセンシングシステム	発明者 兼本大輔, 津永亮多	権利者 大阪大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2023-217844	出願年 2023年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

【科研費研究に関連のある受賞】

・VDEC デザインアワード アイディアコンテスト部門 囑望賞  
三井健司, d.lab-VDECデザイナーズフォーラム2022 (受賞日 令和4年10月1日)

・最優秀ポスター賞

兼本大輔, 瀧本英智, 三井健司, 宮田拓弥, 廣瀬哲也, LSIとシステムのワークショップ 2024 (受賞日 令和6年5月10日)

【プレスリリース】

[https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2023/20230524\\_1](https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2023/20230524_1)

【ホームページ】

<http://ssc.eei.eng.osaka-u.ac.jp/~dkanemoto/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	大木 真  (Ohki Makoto)  (50211785)	山梨大学・大学院総合研究部・教授    (13501)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------