

FS フォーカストセッション「AIエレクトロニクス」 | 一般セッション(ポスター講演): FS フォーカストセッション「AIエレクトロニクス」 (ポスター)

[18p-P06-1~11] FS フォーカストセッション「AIエレクトロニクス」 (ポスター)

[18p-P06-1]

バイナリニューラルネットのための可変精度重みを用いた学習の解析

○楠瀬 黎¹、丸亀 孝生¹、安藤 洸太¹、浅井 哲也¹ (1.北大院情報)

[18p-P06-2]

圧縮センシングにおける量子アニーリングの応用

○山口 晋平¹、ロガ ヴォイチェフ¹、武岡 正裕¹ (1.慶大理工)

[18p-P06-3]

EOポリマー/Siハイブリッド変調器を用いた光畳み込みニューラルネットワークと光リザバーコンピュティングの性能比較

○新屋 暁斗¹、呂 国偉²、喜田 浩二³、佐藤 洸²、横山 士吉²、藤方 潤一¹ (1.徳島大、2.九州大、3.香川大)

[18p-P06-4]

Ag-Ta₂O₅薄膜を用いた物理リザバーが示す特異な温度特性

○(B)奥田 莉央¹、遠藤 明衣¹、福田 峻大¹、西川 翼¹、長谷川 剛¹ (1.早大先進理工)

[18p-P06-5]

色素増感太陽電池を用いた自己発電型人工光電子シナプス素子の作製と光強度によるシナプス応答制御

○(M2)細田 乃梨花¹、小松 裕明¹、生野 孝¹ (1.東理大先進工)

[18p-P06-6]

ZnO薄膜における光電流の時定数が物理リザバの記憶容量に与える影響

○河野上 稔也¹、小松 裕明¹、高梨 皓太郎¹、生野 孝¹ (1.東理大先進工)

[18p-P06-7]

CNT/POM ネットワークを有する紙デバイス実装に向けた多電子系シミュレーション

○渡邊 隼弥¹、大矢 剛嗣^{1,2} (1.横国大院理工、2.横国大 IMS)

[18p-P06-8]

磁気光学回折型ディープニューラルネットワークにおける空間並列演算に関するシミュレーション

○(D)坂口 穂貴¹、栗野 博之²、野中 尋史³、Fatima Zahra Chafi¹、石橋 隆幸¹ (1.長岡技科大、2.豊田工大、3.愛知工大)

[18p-P06-9]

磁気光学回折型ディープニューラルネットワークによる画像処理に関するシミュレーション

○赤川 怜央¹、坂口 穂貴¹、野中 尋史²、栗野 博之³、チャフィ ファティマ ザーハラ¹、石橋 隆幸¹ (1.長岡技科大、2.愛知工大、3.豊田工大)

[18p-P06-10]

磁気光学回折型ディープニューラルネットワークと光路差を利用した光回折型ディープニューラルネットワークの比較

○池田 朱莉¹、坂口 穂貴¹、野中 尋史²、粟野 博之³、チャフィ ファティマ ザーハラ¹、石橋 隆幸¹ (1. 長岡技科大、2.愛知工大、3.豊田工大)

[18p-P06-11]

Magneto-Optical diffractive deep neural Networks by Monte Carlo Method

○FatimaZahra Chafi¹, Hotaka Sakaguchi¹, Hirofumi Nonaka², Hiroyuki Awano³, Takayuki Ishibashi¹ (1.Nagaoka Univ. Tech., 2.Aichi Inst. Tech., 3.Toyota Tech. Inst.)

バイナリニューラルネットのための可変精度重みを用いた学習の解析

Analysis of learning with various weight precisions for binary neural networks

北大院情報, °(M1) 楠瀬 黎, 丸亀 孝生, 安藤 洸太, 浅井 哲也

Graduate School of IST., Hokkaido Univ.,

°Rei Kusunose, Takao Marukame, Kota Ando, Tetsuya Asai,

E-mail: kusunose.rei.g9@elms.hokudai.ac.jp

【はじめに】近年, Neural Network (NN) による人工知能 (AI) の発展が著しく, 様々な応用での社会実装が進んでおり, NN ハードウェアの研究も多様に活発に進められている. その中で, 脳機能を模倣した脳型コンピュータにおいては 2 値 (binary) 重みを利用した推論が報告されており [1], 一般的な NN においても重みを 2 値に変換して用いることができる (binary NN) [2]. しかしながら, 重みを 2 値に変換すると推論性能はある程度劣化すること, および 2 値重みでの学習には確率的制御等の操作が必要であることが知られていた [2]. そこで我々はさらに新しく 2 値重み更新に遺伝的アルゴリズムを組み合わせることによる学習の効率向上を目指している. これまでに, 少ない入力データで 16 ニューロン程度の小型 NN にて重みを 2 値/3 値 (ternary) として確率的に値を変更した際の学習収束性が報告されていた [3]. 一方, 基本的なベンチマークとして用いられる MNIST データでは, 2 値/3 値重みでの NN の学習収束性及び効率的な推論器への活用は十分には調べられていなかった. 今回, 2 値重み推論性能を改善し遺伝的アルゴリズム検討への基盤を構築することを目的に, 重みの精度を可変とした学習時の重み分布を解析したので報告する.

【連続値で学習し 2 値/3 値で推論】入力層 784/隠れ層 128/出力層 10 の NN において, 連続値の重みを用いて MNIST データを学習したのち, 隠れ層から出力層への重みを $-0.2, 0.2$ あるいは 0 を閾値とし, $-1, 0, 1$ (3 値) / $-1, 1$ (2 値) に変換した. その後推論させて認識正答率を求めた. なお学習/推論には 1 Epoch あたり 6000/1000 個のデータを用いた. Fig. 1(a) のように推論における重みが連続値の場合は 94% 程度, 3 値の場合は 91% 程度, 2 値の場合は 86% 程度となった. 学習後の隠れ層から出力層への重みの分布を解析したところ, Fig. 1(b) のように 0 付近の分布が大きいことがわかった. 3 値に対して 2 値の精度低下が著しいのは, 重みを 2 値に変換する際に 0 付近の多数の重みを $-1, 1$ に変換してしまうことが原因だと推察される.

【2 値/連続値で学習し 2 値で推論】上記と同じ NN において, 重みの精度を小数点以下 1bit まで低下させた 2 値重みでの学習を行ったところ, Epoch3 までは 80% 程度の正答率を示したが Epoch4 以降は 10% 程度まで急激に正答率が低下することがわかった. そこで 2 値重みを用いて Epoch3 まで学習し, Epoch4 以降を連続値で学習したところ, 重みを 2 値に変換した推論においても 90% 程度の正答率が得られた (Fig. 2(a)). このことから, 学習の序盤に 2 値重みによる学習を取り入れることで, 2 値重みでの推論性能が改善することがわかった. 学習後の隠れ層から出力層への重みの分布を解析したところ, Fig. 2(b) のように 0 付近の分布が小さいことがわかった. これはすなわち, 2 値重みでの学習により重みの 0 付近の分布が小さくなり 2 値化した際の精度低下が抑えられたと考えられ, 従来報告と比較検討可能な結果である [2]. 本報告により得られた知見をきっかけとして, 今後さらに確率的制御や 2 値重みの突然変異や交叉等を組み合わせた新しい学習方法の探索が期待できる.

[1] P. A. Merolla *et al.*, Science 345, 668–673, 2014. [2] M. Courbariaux *et al.*, NIPS'15, 3123–3131, 2015.

[3] 丸亀ら, 第 83 回応物 2022 秋 21a-C201-1.

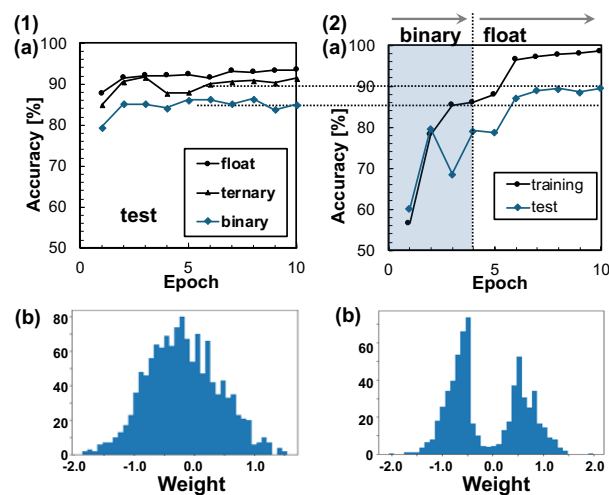


Fig.1 Conventional neural network (NN); (1)(a) test accuracy vs. epoch with three types of weights of float, ternary and binary, (b) weight value histogram after the learning.

Fig.2 Proposed NN learning sequence. (2)(a) Accuracy vs. epoch in training and test using binary and float weights. (b) Weight value histogram after the learning.

圧縮センシングにおける量子アニーリングの応用

Compressive Sensing with Quantum Annealing

慶大理工¹ ○ 山口 晋平¹ ロガ ヴォイチェフ¹ 武岡 正裕¹

Keio Univ.¹, ○Shimpei Yamaguchi¹, Wojciech Roga¹, Masahiro Takeoka¹

E-mail: shimpeiyamaguchi@keio.jp

圧縮センシング [1][2] はナイキストの標本化定理を超える効率的なデータの取得および復元を実現する手法として近年注目されている。圧縮センシングにおいて、対象となるデータが大きくなると復元アルゴリズムの時間複雑度が大きくなるという問題がある。この問題に対して、我々は組合せ最適化問題の近似的解法の一つとして利用が進んでいる量子アニーリング手法 [3] を復元アルゴリズムに応用する。量子アニーリングが古典的手法より常に高速である理論的根拠はまだないが、例えば最適化問題の一つであるスピングラス問題では古典アルゴリズムに比べて数千倍の高速化が報告されている [4]。

測定の対象となるベクトル $x \in \mathbb{R}^N$ と測定行列 $A \in \mathbb{R}^{m \times N}$ ($m \ll N$) の積 $y \in \mathbb{R}^m$ が測定結果となる。測定行列としては要素のランダム性を持ったものが採用されることが多いが、我々は行列 A をうまく構成することでこの操作をイジング問題に落とし込み、量子アニーラの応用を可能にした (図 1)。しかし、測定行列のランダム性は正しい信号の復元を行う精度と関係しているため、構造を持たせることによるデメリットも存在する。したがって、我々の測定行列を使用した際の復元精度についての検討もシミュレーションにより行った。図 2 では非ゼロ成分が 3 の信号に対して我々の測定行列を用いた場合の最悪条件での成功確率を示している。復元精度の計算は正しい信号を復元する確率として計算されるが、この計算は $\#P$ の時間複雑度を持つ。ゆえに我々の結果は小さい問題でのシミュレーションにとどまる。また、正しい信号が復

元される確率の計算に対して量子シミュレータの一つであるボソンサンプラーの応用が可能であると考えられる。

Random



Structured

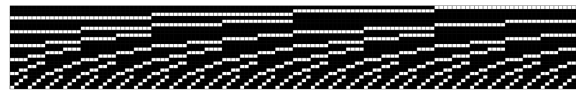


図 1 我々が提示する測定行列

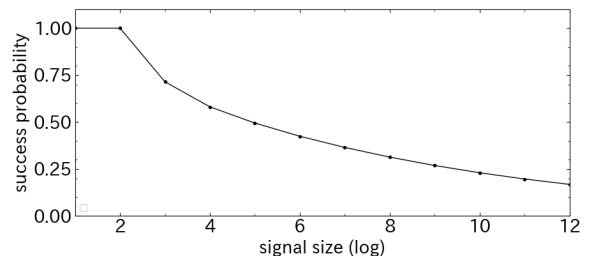


図 2 非ゼロ成分が 3 での成功確率 (最悪条件)

参考文献

- [1] D. Donoho, *IEEE Trans. Inf. Theory*, 2006, **52**(4), 1289 – 1306.
- [2] E. J. Candes, J. Romberg, and T. Tao, *IEEE Trans. Inf. Theory*, 2006, **52**(12), 5406–5425.
- [3] T. Kadowaki and H. Nishimori, *Phys. Rev. E*, 1998, **58**(5), 5355 – 5363.
- [4] T. Albash and D. A. Lidar, *Phys. Rev. X*, 2018, **8**(3), 031016.

EO ポリマー/Si ハイブリッド変調器を用いた光畳み込みニューラルネットワークと光リザーバーコンピューティングの性能比較

Comparison on Performance for Optical Convolutional Neural Networks and Photonic Reservoir Computing Using EO polymer/Si Hybrid Modulator

徳島大学¹, 九州大学², 香川大学³

○(M2)新屋 暁斗¹, 呂 国偉², 喜田 弘司³, 佐藤 洸², 横山 士吉², 藤方 潤一¹

Tokushima Univ.¹, Kyushu Univ.², Kagawa Univ.³

○(M2) Akito Shinya¹, Guo-Wei Lu², Koji Kida³, Hiromu Sato², Shiyoshi Yokoyama², and Junichi Fujikata¹

E-mail: c612336018@tokushima-u.ac.jp

1. はじめに

光リザーバーコンピューティング(光 RC)は再帰型ニューラルネットワーク(RNN)の 1 つであり、入力データとリザーバー層の結合重みおよびリザーバー層内のフィードバック重みを固定し、出力層で学習を行うという特徴がある。そのため計算システム構成が比較的簡易で物理実装に適しており、高速・低消費電力で光演算を実行することが可能であると期待されている[1-2]。

本研究では、EO ポリマー/Si ハイブリッド光変調器を用いた光畳み込みニューラルネットワーク(OCNN)[3]と非線形導波路を集積した光 RC を検討し、画像認識精度と計算時間を比較検討した。

2. 光伝送シミュレーション

Fig. 1 に光 RC 回路の概略図を示す。本検討では 51 枚の MNIST データセットをそれぞれマスキング処理し、0~9 文字の手書き文字の入力画像データを光 RC 回路で時間遅延伝送し、リザーバー層を実装した。この時リザーバー層に非線形導波路を集積し、その効果を併せて検証した。得られた出力波形は、出力層において重みを学習して読出しを行い、画像識別を実施した。入力波形と出力波形をそれぞれ Fig. 2(a), (b)に示す。出力波形において読出し時に前半 50%を利用して出力層の重みを学習し、後半 50%を波形予測した。その結果、約 86.3%の精度で画像識別することが可能であった。

3. OCNN との性能比較

Fig. 3(a), (b)に光 RC および OCNN を用いて 0~9 の MNIST 画像識別を行った結果を示す。OCNN に関して 10 種の固定カーネルを用いることにより、92.2%の精度で画像識別することが可能であった。一方、時間遅延型光 RC を用いた場合、画像認識精度は約 86.3%程度であり、画像認識精度では OCNN の方が若干高い精度が得られる結果となった。一方、画像認識に必要な回路規模や処理時間に関しては、光 RC を利用することで大幅に低減されることが検証された。

4. まとめ

EO ポリマー/Si ハイブリッド変調器を用いた OCNN と光 RC を検討し、画像認識精度と計算時間を比較検討した。その結果、光 RC を用いることで、高速かつ比較的高い精度で画像予測・識別が可能であることを検証した。

謝辞

本研究成果の一部は、国立研究開発法人情報通信研究機構(NICT)の委託研究(JPJ012368C02101)から得られたものです。また、本研究の一部は科研費

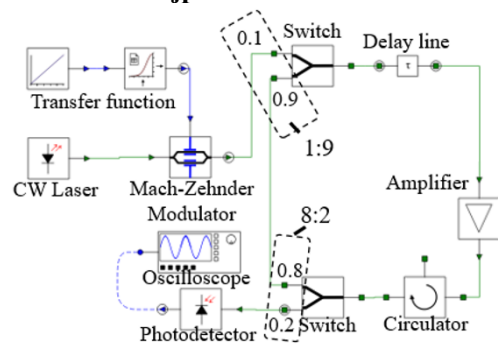


Fig. 1 Schematic of photonic RC circuit configuration in simulation.

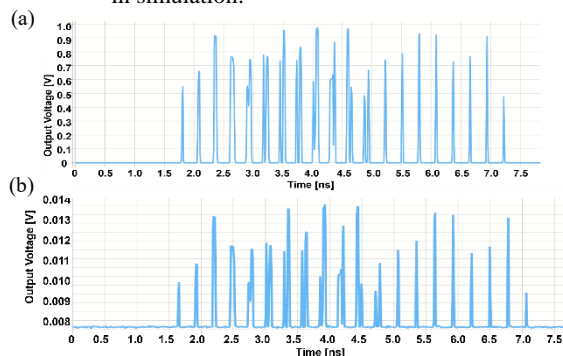


Fig. 2 (a)MNIST input data and (b) MNIST output data for photonic RC circuit.

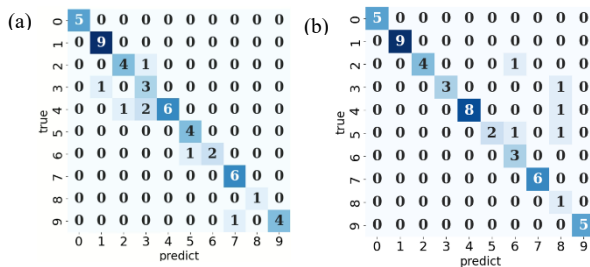


Fig. 3 MNIST labels recognition results using (a) photonic RC and (b) OCNN circuits.

(JP22H01555, JP23H00274, JP23K22825), SCAT 研究助成の支援を受けて行われました。

参考文献

- [1] Takuma Tsurugaya et al., "Cross-gain modulation-based photonic reservoir computing using low-power-consumption membrane SOA on Si," *Opt. Express* **30**(13), 22871 (2022).
- [2] Guy Van der Sande, Daniel Brunner and Migel C.Soriano, "Advances in photonic reservoir computing," *Nanophotonics* **6**(3), 561 (2017).
- [3] Akito Shinya et al., "光畳み込みニューラルネットワークを用いた高効率画像識別", 電子情報通信学会総合大会 c3_4-27 (2024).

Ag-Ta₂O₅ 薄膜を用いた物理リザーバーが示す特異な温度特性

Temperature Dependence of a Ag doped Ta₂O₅-based Physical Reservoir

早大先進理工 ○(B)奥田 莉央, (B)遠藤 明衣, (B)福田 峻大, (B)西川 翼, 長谷川 剛

Waseda Univ., °Rio Okuda, Mei Endo, Takao Fukuda, Tsubasa Nishikawa, Tsuyoshi Hasegawa

E-mail: rio-orange138.33@akane.waseda.jp

はじめに：固体電解質内にイオンが作る内部電場を利用することで物理リザーバーの動作を実現できる。我々もこれまでに、硫化銀や Ag をドーピングした Ta₂O₅ 薄膜などを用いて動作実証を行ってきた。一般的に、イオンの拡散速度は温度の関数である。そこで本研究では、イオン拡散に基づくリザーバー動作の検証を目的として、リザーバー動作の温度依存性を測定した。

実験方法：SiO₂ 基板上に、直径 1mm ないし 1.5mm の円周上に 8 つの電極を等間隔で作製した。続いて、この円形領域に Ag ドープ Ta₂O₅ 薄膜をスパッタ成膜した。ターゲットとして Ta₂O₅ と Ag の混合比（重量比）が 1:1 および 4:1 のものを用いた。温度可変の真空プローバーを用いて、矩形波入力による時定数の測定および短期記憶容量の評価を、室温～398K の温度範囲で行った。

結果と考察：Fig. 1(a)に組成比が 1:1 の素子の測定結果を示す。予想通りに温度上昇に伴って時定数は小さくなっていったが、398K で跳ね上がった。続いて測定した温度下降時には、時定数は元に戻らず、ほぼ一定の値を示した。398K での跳ね上がりは見られなかったものの、組成比が 4:1 の素子でも、温度上昇で小さくなった時定数が温度を下げても元に戻りきらない現象が見られた (Fig. 1(b))。以上の測定は直径 1mm の素子で行ったので、直径 1.5mm のリザーバーサイズ、組成比が 4:1 の素子を用いて時定数を測定してみた。その結果、温度上昇に伴って小さくなった時定数が室温でほぼ元に戻った (Fig. 1(c))。これらの測定では同じ印加電圧 (3V) を用いたため、直径が大きいほどリザーバー層内に形成される電位勾配は小さくなる。Fig.1 に示した結果は、Ag のドーピング量が多いほど不可逆的な現象が高温領域で起こること、その現象は電圧印加によって形成される内部電場の大きさにも依存することを示唆している。不可逆過程の候補として Ta₂O₅ 層にドーピングされた Ag 原子の粒界への還元が考えられる。現在、このモデルに基づき、解析を進めている。

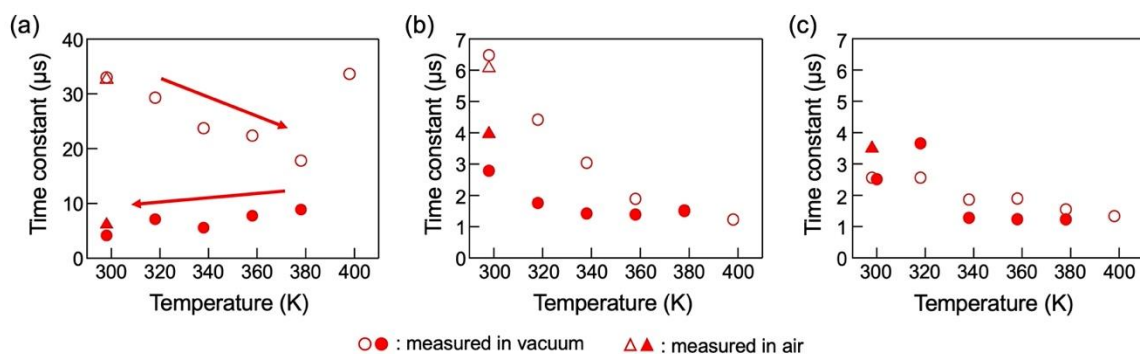


Fig. 1 Temperature dependence of the time constant. Ta₂O₅:Ag ratio and a reservoir area size is (a) 1:1 and 1 mm, (b) 4:1 and 1 mm, and (c) 4:1 and 1.5 mm, respectively.

色素増感太陽電池を用いた自己発電型人工光電子シナプス素子の作製と光強度によるシナプス応答制御

Fabrication of self-powered artificial optoelectronic synaptic device using DSCs and control of PPF indices by change in input light intensities

東理大先進工, °(M2)細田乃梨花, (D)小松 裕明, 生野 孝

Tokyo Univ. of Science, °N. Hosoda, H. Komatsu, T. Ikuno E-mail: tikuno@rs.tus.ac.jp

人間の視覚システムを模倣した人工光電子シナプス素子は、光センサに AI 機能を付与したインセンサ型エッジ AI デバイスとして注目されている。しかし、これまで報告された多くの人工光電子シナプス素子は photocurrent 型であるため、エッジ AI デバイスとして動作させるには外部回路からのエネルギー供給が必要である^[1]。加えて、出力信号が pA と小さく、ノイズの多い場面では S/N 比の低下が予想される^[2]。そこで我々は、素子自身が発電した電力で AI 演算を行う photovoltaics 型人工光電子シナプス素子に着目している。

本研究では、色素増感太陽電池(DSC)を用いた photovoltaics 型の人工光電子シナプス素子を作製し、本素子が自身で発電した電力だけで人工シナプス素子として動作することを確認した。加えて、光強度の時系列変化がシナプスの応答の評価指標の一つである paired pulse facilitation (PPF) index に及ぼす影響を評価した^[3]。

FTO ガラス上の TiO₂ 膜に SQ2 色素(200716FM, SOLARONIX)を吸着させて光作用極とした。対極に Pt 基板、電解液は I/I₃ 電解液を使用し、DSC を作製した。電圧測定には DAQ(USB-6366, NI)を使用し、入力光は単色光($\lambda=658$ nm)を使用した。図 1(a)に光強度の異なる 10 回の光パルスに対する DSC の開放電圧応答(V_{oc})を示す。照射した光パルスは、パルス幅 T_P 及びパルス間隔 ΔT は 2 ms, 前半 5 回の光強度は 5 mW, 後半 5 回は 1 - 15 mW とした。 V_{oc} は、異なる強度の光パルスによって、シナプス増強及び抑制を示した。このことから、DSC は photovoltaics 効果によりゼロエネルギーでシナプス応答を示すことがわかる。図 1(b)に、二度のパルスの光強度 P_1, P_2 の関数とした PPF index の分布を示す。ここで PPF index は、一度目の光パルスによる開放電圧と二度目の光パルスによる開放電圧の比である。 $P_1=P_2$ のとき PPF index は 100% となったが、 $P_1 < P_2$ の範囲では 100% より大きくシナプス応答の増強、 $P_2 < P_1$ では 100% より小さく抑制を示した。この結果は入力光の強度を調節することによって PPF index が制御可能であることを示す。当日は DSC の時定数の光強度依存に関する結果とともに、異なる強度の入力光に対する DSC のキャリア輸送メカニズムについても議論を行う。

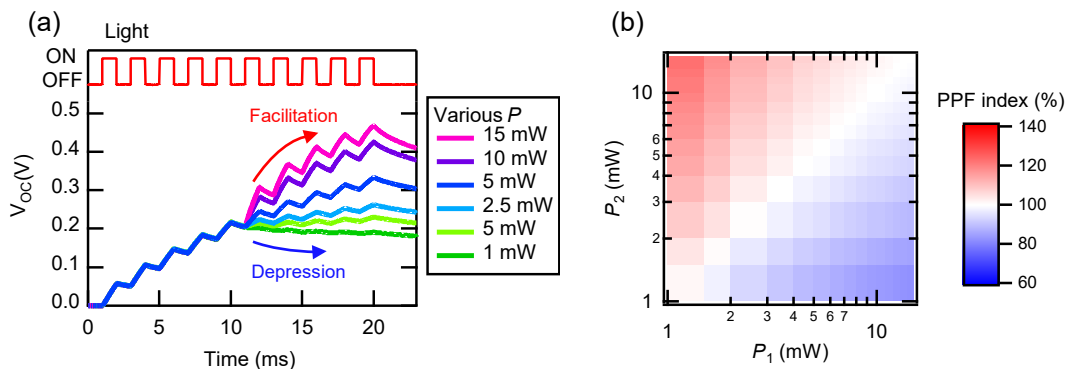


Fig.1 (a) V_{oc} induced by ten light pulses with different light intensities (P : 1 - 15 mW, T_P : 2 ms)

(b) PPF indices of DSC as a function of input light intensities of two pulses P_1 and P_2 .

【謝辞】本研究は JST 科学技術イノベーション創出に向けた大学フェローシップ創設事業 JPMJFS2144 及び、JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム JPMJSP2151 の支援を受けたものです。

[1] H. Komatsu et al., Adv. Electron. Mater., 10, 2300749 (2024). [2] J. Lao et al., Adv. Sci., 9, 2106092 (2022). [3] H. Komatsu et al., In preparation (2024).

ZnO 薄膜における光電流の時定数が物理リザバの記憶容量に与える影響

The effect of time constant of photocurrent in ZnO thin films on memory capacity of physical reservoir

東理大先進工, °河野上 稔也, 小松 裕明, 高梨 皓太郎, 生野 孝

Tokyo Univ. of Science, °Toshiya Kounoue, Hiroaki Komatsu, Kotaro Takanashi, Takashi Ikuno

E-mail: tikuno@rs.tus.ac.jp

Persistent photoconductivity (PPC) 効果は、光照射が終了しても数ミリ秒から数時間にわたって光電流の緩和が続く現象である^[1]。PPC 効果を示す材料は光センサの応答速度を悪化させることから、これまで結晶性の制御やゲート電圧の印加によって発現が抑制されてきた^[2]。一方で、PPC 効果が人間の脳に見られる短期記憶性に類似するため、近年では人工光電子シナプスの材料として注目を集めている。これまで我々は、PPC 効果による遅い時定数を利用した ZnO 系人工光電子シナプスを作製し、本素子が PRC へ応用可能であることを報告した^[3]。しかし、PPC 効果による遅い時定数が PRC の短期記憶性に及ぼす影響は分かっていない。本研究では、スパッタ位置を変えることで結晶性を制御して種々の時定数を持つ ZnO 薄膜を作製し、光電流の時定数が PRC の短期記憶性の評価指標である記憶容量 (MC) に与える影響を調べた^[4]。

ZnO 薄膜はガラス基板上にスパッタ成膜した。ZnO の結晶性を変えるため、ZnO ターゲット直上 (on-axis) と、ZnO ターゲット直上から 0.5 cm 外側 (off-axis) に基板を配置した。作製した ZnO 薄膜の結晶性及び微細構造は XRD, SEM を用いて評価した。光電流を測定するため、Au 電極を堆積させ、UV パルス光 (波長: 365 nm, 光強度: 10 mW/cm²) を照射した。ZnO 薄膜の光電流を図 1(a), (b)に示す。On-axis の立ち上がり時定数は、3.7 ms, 2.5 s で、立ち下がり時定数は 0.40 ms, 0.10 s であった。一方で、off-axis の立ち上がり時定数は、17 ms と 2.5 s で、立ち下がり時定数は 1.5 ms, 2.9 s であった。Off-axis の秒オーダーの遅い時定数は PPC 効果によるものと考えられる。MC を評価するため、ZnO 薄膜を物理リザバとして動作させ、short-term memory タスクを実行した。図 1(c)にパルス幅 (T_p) に対する MC を示す。On-axis では T_p を 1, 10 s に設定すると、MC は低下した。一方、off-axis では T_p を 1, 10 s に設定しても MC は低下しなかった。したがって、早い時定数と遅い時定数を持つ物理リザバを用いた PRC では、1 ms から 10 s の広いタイムスケールにおいて MC は低下しないことがわかった。

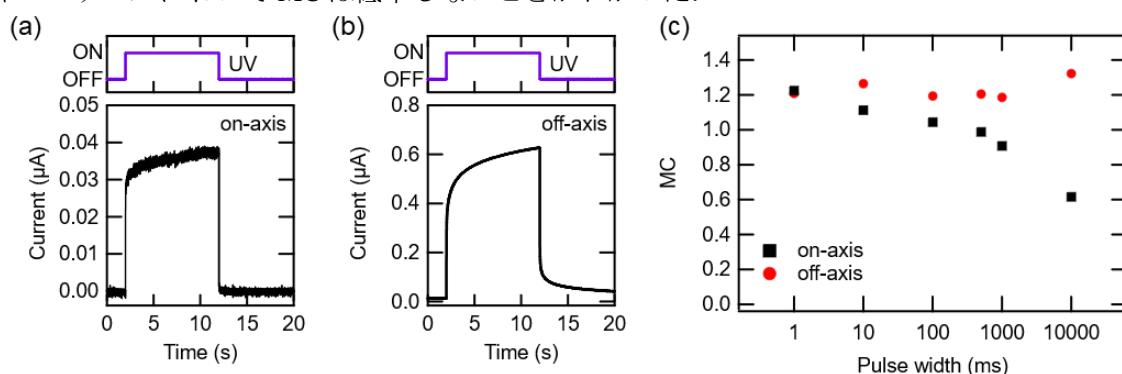


Fig.1 Optical response of the (a) on-axis and (b) off-axis ZnO thin film.(c) MC at various pulse widths.

【謝辞】本研究は JST 科学技術イノベーション創出に向けた大学フェローシップ創設事業 JPMJFS2144 及び、JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム JPMJSP2151 の支援を受けたものです。

[1] H. Komatsu et al, Nanomaterials, 12, 940(2022). [2] S. Jeon et al, Nat. Mater., 11, 301-305(2012).

[3] H. Komatsu et al, Adv. Electron. Mater. 10, 2300749(2024). [4] H. Komatsu et al, in preparation(2024).

CNT/POM ネットワークを有する紙デバイス実装に向けた 多電子系シミュレーション Multiple-electron System Simulation

for Implementation of Paper Device with CNT/POM Network

渡邊 隼弥¹, 大矢 剛嗣^{1,2}

1 横国大院理工, 2 横国大 IMS

Shunya Watanabe¹, Takahide Oya^{1,2}

1 Grad. School of Eng. Sci., Yokohama Nat'l Univ., 2 IMS, Yokohama Nat'l Univ.

Email: watanabe-shunya-cb@ynu.jp

1. 研究背景

現在までの AI の発展を支えてきた一つは脳の神経ネットワークをもとにしたニューラルネットワークである。ニューラルネットワークは従来のノイマン型コンピュータによるソフトウェアベースの開発が進められている。一方、神経細胞（ニューロン）の動きを模倣するニューロモルフィックデバイスに関する研究も盛んに行われている。

近年、カーボンナノチューブ（CNT）とポリオキソメタレート（POM）によって構成される CNT/POM ネットワークがニューロモルフィックデバイスとして注目されている。単層 CNT（SWNT）を用いた SWNT/POM ランダムネットワークに電圧が印加されると、パルスが発生することが報告されている^[1]。また CNT/POM ネットワークをリカレントニューラルネットワークの一つであるリザーバコンピューティングに応用する研究も報告されている^[2]。

2. 研究内容

POM はエレクトロンスポンジと呼ばれる、分子構造を変化させることで多数の電子を蓄積する分子である。CNT/POM ネットワークでは、ネットワーク内の CNT と POM のジャンクション部分で、複数の電子が POM を出入りすることに伴い、パルスが観測されと考えられている。

すでに単電子回路のシミュレーションを行っており、これまでに例えば、単電子回路を応用した単電子リザーバコンピューティングに関する研究について報告している^[3]。今回は、CNT/POM ネットワークにおける CNT と POM のジャンクションを

想定し、多電子系に拡張したシミュレーションを行った。シミュレーション結果（Fig. 1）において、パルスが発生することが確認できた。詳細は講演にて述べる。

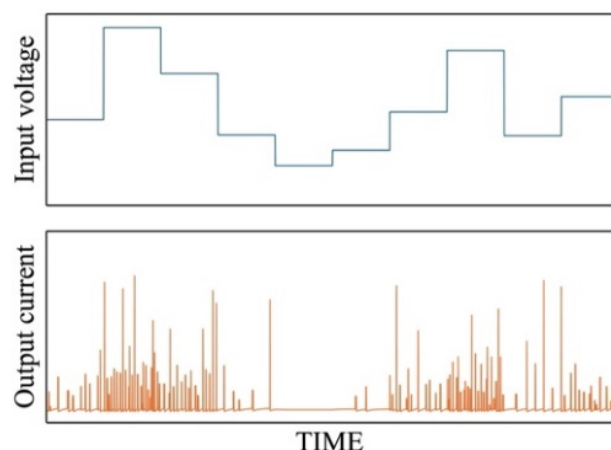


Fig. 1 Simulation result for multiple-electron system, where a junction in CNT/POM network is supposed.

【参考文献】

- [1] H. Tanaka et. al., Nature Communications, vol. 9, 2693, 2018.
- [2] M. Akai-Kasaya et. al., Neuromorph. Comput. Eng., vol. 2, 014003, 2022.
- [3] 渡邊隼弥, 大矢剛嗣, 第 71 回応用物理学会春季学術講演会, 25a-31A-6, 2024.

【謝辞】

本研究の一部は JSPS 科研費・基盤研究(A)(JP23H00169), 挑戦的研究(萌芽)(JP23K17814)、および(公財)柏森情報科学振興財団の助成を受け実施された。

磁気光学回折型ディープニューラルネットワークにおける 空間並列演算に関するシミュレーション

Simulation for parallel processing on magneto-optical diffractive deep neural network

長岡技科大¹, 豊田工大², 愛知工大³ ◯(D)坂口 穂貴¹, 栗野 博之²,

野中 尋史³, Fatima Zahra Chafi¹, 石橋 隆幸¹

Nagaoka Univ. of Tech.¹, Toyota Tech. Inst.², Aichi Inst. of Tech.³, ◯H. Sakaguchi¹, H. Awano²,

H. Nonaka³, F. Z. Chafi¹, T. Ishibashi¹

E-mail: s193209@stn.nagaokaut.ac.jp

はじめに ディープラーニングの膨大な消費電力の問題を解決するため、我々は磁性体の磁気光学効果を利用した磁気光学回折型ディープニューラルネットワーク(MO-D²NN)の開発に取り組んでいる^{1,2)}。前回、モンテカルロ法を用いたオンライン学習技術の開発について報告した³⁾が、学習時間を短縮させる必要がある。そこで、今回は、一枚の回折層に複数の磁区パターンを設置して演算を並列に行うことで、演算の高速化の検討を行った。発表では、MO-D²NNによる空間並列演算の学習シミュレーション結果について報告する。

実験方法 MNISTの手書き数字4種類の分類を1枚の隠れ層を用いて行った。計算モデルの模式図を図1に示す。隠れ層には50 μm の間隔を設けて4つの同じ磁区パターンを配置した。各磁区パターンは1 μm^2 の磁区100 \times 100個で構成され、ファラデー回転角は3.3 $^\circ$ とした。入射光は波長532nmの直線偏光とし、出力信号として偏光面の角度の大きさを検出した。学習は100枚の画像を利用して、モンテカルロ法を用いたアルゴリズムで行った。ランダムに選択した磁区を反転させ、損失が上昇した際のみ反転させた磁区をもとの状態に戻した。この処理を1000回繰り返した後、異なる100枚の画像を用いて分類精度の評価を行った。

結果と考察 1000回の繰り返しの結果、本モデルの学習データに対する分類精度は95%、テストデータに対する分類精度は79%だった。隠れ層に1つの磁区パターンがあるモデルでは、テストデータに対する正解率が83%であり、並列計算による学習が可能であることが明らかになった。本手法によって、MO-D²NNの学習に必要な計算の高速化や低消費電力化が期待できる。

謝辞 本研究はJSPS科研費JP23H04803, JP24KJ1177の助成を受けて実施した。

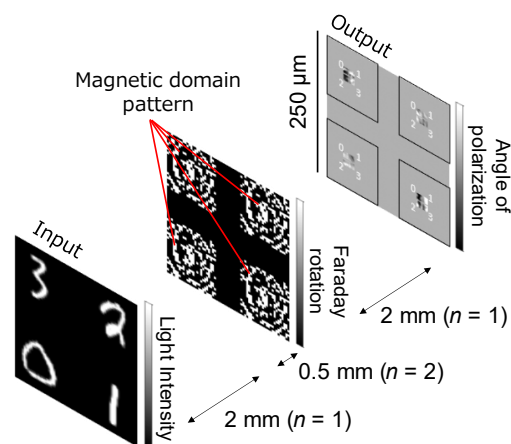


Fig. 1 A schematic drawing of parallel processing on MO-D²NN.

- 1) T. Fujita et al. Opt. Exp. 30, 36889 (2022). 2) H. Sakaguchi et al. IEEE Trans. Magn. 59, 2500704 (2023).
3) 坂口他, 第71回応用物理学会春季学術講演会, 24a-31A-4 (2024).

磁気光学回折型ディープニューラルネットワークによる 画像処理に関するシミュレーション

Simulation of image processing for Magneto-Optical Diffraction Deep Neural Networks

長岡技科大¹, 愛知工大², 豊田工大³ ○赤川 怜央¹, 坂口 穂貴¹, 野中 尋史²,

栗野 博之³, Fatima Zahra Chafi¹, 石橋 隆幸¹

Nagaoka Univ. Tech.¹, Aichi Inst. Tech.², Toyota Tech. Inst.³, ○R. Akagawa¹, H. Sakaguchi¹,

H. Nonaka², H. Awano³, F. Z. Chafi¹, T. Ishibashi¹

E-mail: s191001@stn.nagaokaut.ac.jp

【はじめに】

近年、Deep Neural Network が注目され、急速な発展を遂げ、画像処理や自然言語処理、音声認識など様々な分野で応用されているが、処理速度や消費電力の増大が問題となっている。それらの問題を解決する物理デバイスとして、我々は磁気光学効果を利用した光回折型ディープニューラルネットワーク (MO-D²NN)を提案した¹⁾。今回は、MO-D²NN の2次元の画像データを高速に並列処理できる特徴を生かしたタスクとして、手書き数字の画像を偶数または奇数に分類する画像処理タスクの性能について調べた。

【実験方法】

1 μm 角の大きさの磁区を 100×100 並べた隠れ層を4層としたモデル (Fig.1) を構築し、各層の距離を $d_1, d_2, d_3, d_4, d_5(\text{mm})$ とし、光強度を出力信号として学習を行い、磁区パターンを決定した。入射光は、波長 532 nm の直線偏光とした。計算には、Python 3.9.16 と Tensorflow 2.9.2 を使用した。学習は、MNIST の手書き数字データセットに対し、偶数の場合は三角形、奇数の場合は逆三角形の画像が出力されるように行った。学習用に 60000 枚を用いて、エポック数を 30、バッチサイズを 10 に設定し、繰り返し学習を行った。

【結果と考察】

隠れ層のファラデー回転角 θ_F を60 deg.、各隠れ層の層間距離を全て 0.5 mm として学習した場合の入力画像と出力画像を Fig.2 に示す。奇数の画像を入力した場合は、逆三角形を出力され、偶数の画像の場合は、三角形が出力された。この結果から、MO-D²NN を用いて偶数と奇数をそれぞれ三角形と逆三角形という画像に変換できることがわかった。その他の層数や層間距離、ファラデー回転角などの各パラメータを変えたときの計算結果などの詳細は当日報告する。

【謝辞】 本研究の一部は JSPS 科研費 JP23H04803 の助成を受けたものです。

【参考文献】 1) T. Fujita et al., Optics Express, Vol. 30, 36889 (2022)

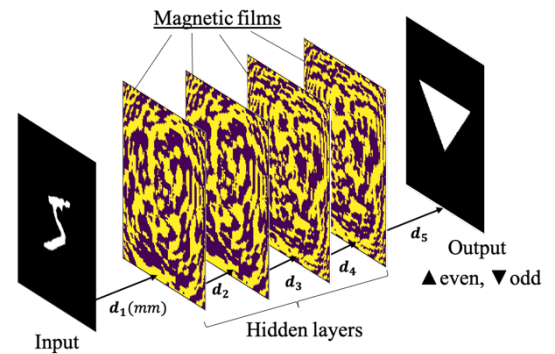


Fig.1 A schematic drawing of MO-D²NN

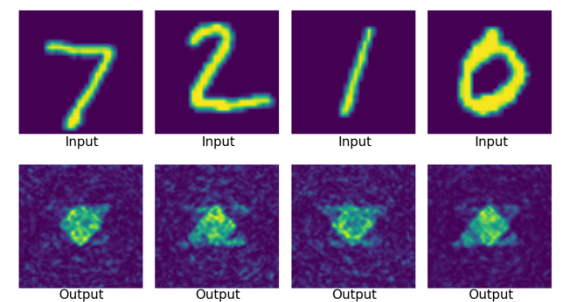


Fig.2 Input images and output images obtained by the simulation. Triangle and inverted triangle were generated for even and odd numbers, respectively.

磁気光学回折型ディープニューラルネットワークと
光路差を利用した光回折型ディープニューラルネットワークの比較
Comparison of magneto-optical diffractive deep neural networks and diffractive deep
neural networks utilizing optical path differences

長岡技科大¹, 愛知工大², 豊田工大³ ○(M2)池田 朱莉¹, (D)坂口 穂貴¹, 野中 尋史²,
栗野 博之³, Fatima Zahra Chafi¹, 石橋 隆幸¹

Nagaoka Univ. Tech.¹, Aichi Inst. Tech.², Toyota Tech. Inst.³

○J. Ikeda¹, H. Sakaguchi¹, H. Nonaka², H. Awano³, F. Z. Chafi¹, T. Ishibashi¹

E-mail: s191005@stn.nagaokaut.ac.jp

光回折型ディープニューラルネットワーク(D²NN)は、積層型の光ニューラルネットワークの一種であり、低消費電力かつ高速な計算の実行が期待されている。しかし、可視光で動作し、書き換えが可能なデバイスの開発が課題となっている。それらの課題を解決すべく、我々は磁性材料の磁気光学効果を利用した Magneto-Optical Diffractive Deep Neural Network (MO-D²NN)を提案した¹⁾。今回は MO-D²NN と、先行研究である光路差を利用した D²NN との性能について比較と評価を行った。

Fig. 1 (a) は波長 633 nm の直線偏光の光を入射光とし、1 μm角の大きさのガラス製ニューロンを 100 × 100 並べた隠れ層を有する D²NN モデルを示す。それに対し、Fig. 1 (b) は波長 532 nm の直線偏光の光を入射光とし、1 μm角の大きさの磁区を 100 × 100 並べた隠れ層を有する MO-D²NN モデルを示す。これらのモデルを Python 3.10.11 と TensorFlow 2.9.2 を用いて構築した。ここで D²NN モデルは光強度、MO-D²NN モデルは光強度もしくは偏光角(AoP)を出力信号とした。どちらのモデルも位相変調量を約 1 deg.とし、MNIST の手書き数字データセット 60,000枚を用いて学習を行った。層間距離は入力側から順に0.5 mm ごとに变化させ正解率が高くなる距離で定めた。

Table. 1 に隠れ層を 2 層持つモデルによる MNISTの手書き数字データセットの分類正解率を示す。どちらモデルも光強度を検出した場合には、正解率は18%程度と低い結果になったが、AoP の場合は 80%程度の高い精度が得られた。この結果から、MO-D²NN は小さな位相変調量でも高い精度が得られることが示された。

本研究の一部は JSPS 科研費 JP23H04803 の助成を受けたものである。

【参考文献】 1)T. Fujita *et al.* Opt. Exp., 30, 36889 (2022).

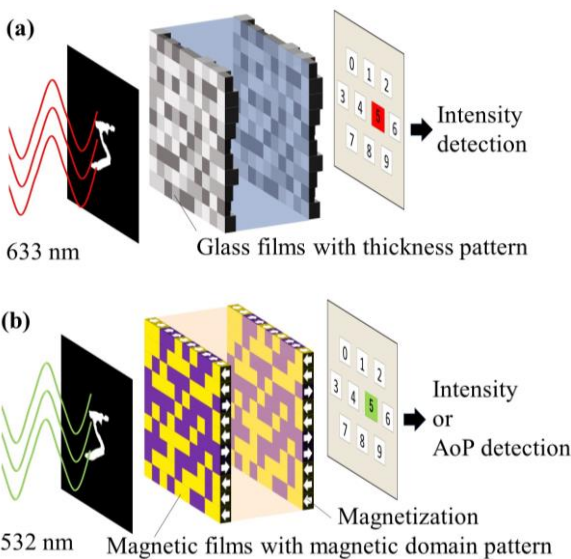


Fig. 1 A schematic drawing (a) D²NN utilizing optical path differences and (b) MO-D²NN.

Table 1 Accuracy of 2-layer model with phase difference of approximately 1 deg.

	D ² NN	MO-D ² NN	
Detection	Intensity	Intensity	AoP
Accuracy	18.55%	17.84%	78.59%

Training of Magneto-Optical diffractive deep neural Networks by Monte Carlo Method

Nagaoka Univ. Tech.¹, Aichi Inst. Tech.², Toyota Tech. Inst.³,

[○]F. Z. Chaff¹, H. Sakaguchi¹, H. Nonaka², H. Awano³, T. Ishibashi¹

E-mail: cfz@vos.nagaokaut.ac.jp

Deep Neural Networks have been surprisingly developed and implemented in various applications. However, as the DNNs have become more complicated, the high-speed computing and the energy consumption are much challenging. Recently, magneto-optical diffractive deep neural network (MO-D²NN) device has been proposed ^[1,2]. Here, we used Monte Carlo (MCM) method to train MO-D²NN to recognize the handwritten digits, where the magnetic patterns and the distance between the hidden layers are optimized.

The model of this calculation contains two hidden layers with the distance between the input layer and the first layer, the distance between the hidden layers and the distance from the second layer to the output are considered as 2.0, 3.5, and 2.0 mm, respectively. The incident linearly polarized light is used as a light source with a wavelength of 532 nm. MNIST dataset has been chosen as input data for the classification of the handwritten digits. Magnetic domain patterns in the hidden layers, which were randomly prepared, were rewritten using the MCM with 60,000 steps, for 1,000 inputs in parallel process.

Figure 1 shows the recorded magnetic domain patterns at the size of $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ after learning by: a. MCM for 2 hidden layers with the distances 2.0, 3.5, 2.0 mm, b. MCM for two hidden layers with the distances 2.0, 2.0, 1.0 mm ^[3]. It is clearly observed that the magnetic domain is successfully determined using MCM, and the accuracy is improved accordingly.

Figure 2 presents the accuracy and the loss evolution against the steps of MCM. This confirms the reliability of the Monte Carlo method into the training process of the MO-D²NN.

This work has been supported by JSPS Grant-in-Aid Scientific Research JP23H04803.

[1]. T. Fujita, *et al.*, Opt. Exp. 30, 36889 (2022).

[2]. H. Sakaguchi, *et al.*, doi.10.1109. (2023).

[3]. R. Oya's Master thesis, Nagaoka Univ. Tech., (2023).

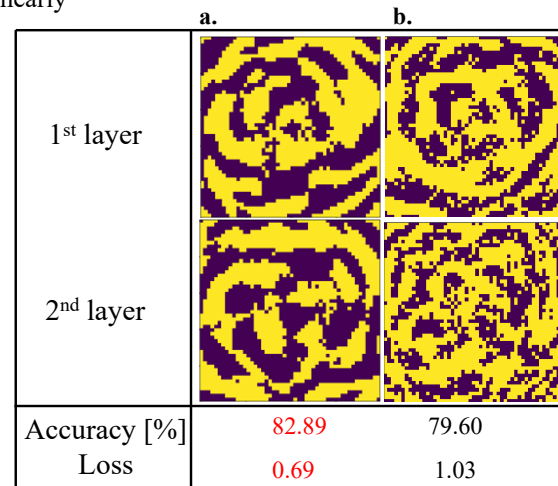


Figure 1. Magnetic domain patterns in the 1st and 2nd hidden layers of MO-D²NN, determined by: a., b. MCM with different distances.

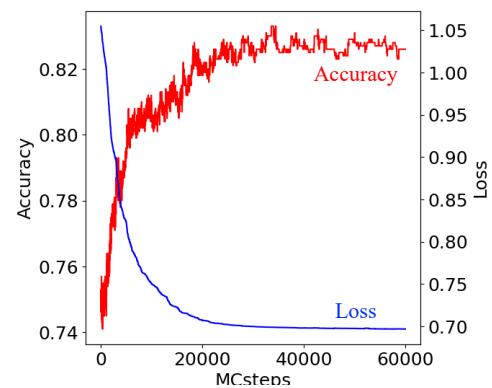


Figure 2. Accuracy and loss versus MCsteps.

FS フォーカストセッション「AIエレクトロニクス」 | 一般セッション(口頭講演): FS.1 フォーカストセッション「AIエレクトロニクス」

[16a-A33-1~11] FS.1 フォーカストセッション「AIエレクトロニクス」

PR

secret place

[16a-A33-1]

ナノ抵抗変化メモリ素子を用いたニューラルネットワークのスケールアウトへの展望

○丸亀 孝生¹、楠瀬 黎¹、川合 遼²、三谷 祐一郎² (1.北大院情報、2.東京都市大)

[16a-A33-2]

アナログメモリスタの線形・多段階抵抗レベル制御

○DIAO ZHUO¹、Meng Zijie¹、山本 遼平¹、藤平 哲也¹、酒井 朗¹ (1.阪大院基礎工)

[16a-A33-3]

Online training of the energy harvester by using extreme learning machine

○(M2C)Yuxiang Wen¹、Takeaki Yajima¹ (1.Kyushu Univ.)

[16a-A33-4]

ハイブリッドナノドットフローティングゲートメモリの短期記憶特性

○(M2)白 鍾銀¹、田岡 紀之²、牧原 克典¹ (1.名大院工、2.愛知工大)

[16a-A33-5]

Cuイオン含有PVAを抵抗変化層に用いたReRAMの溶液濃度依存性

○岩澤 侑司¹、小林 亮太¹、永井 裕己¹、相川 槇也¹ (1.工学院大工)

[16a-A33-6]

[The 56th Young Scientist Presentation Award Speech] Study on correlation between GCMS mapping and QCM sensing signals for ternary gas mixtures.

○Thanisorn Oonpitipongsa¹、Chaiyanut Jirayupat^{1,2}、Wataru Tanaka¹、Takuro Hosomi¹、Tsunaki Takahashi¹、Takeshi Yanagida^{1,3} (1.Eng., The Univ. of Tokyo, 2.Mi-6 Ltd, 3.IMCE, Kyushu Univ.)

[16a-A33-7]

量子リザーバーによるMNIST分類性能の複数NISQデバイス間での網羅的評価

○境 隆二¹、大羽 秀明¹、中川 英之¹、上松 和樹¹、武口 智行¹、飯山 悠太郎²、永野 廉人²、澤田 龍²、田中 純一²、寺師 弘二² (1.東芝研究開発センター、2.東京大学素粒子物理国際研究センター)

[16a-A33-8]

密度行列と最大混合状態の類似度による量子リザーバー回路の性能判定法

○大羽 秀明¹、境 隆二¹、上松 和樹¹、中川 英之¹、武口 智行¹、飯山 悠太郎²、永野 廉人²、澤田 龍²、田中 純一²、寺師 弘二² (1.東芝 研究開発センター、2.東京大学 素粒子物理国際研究センター)

[16a-A33-9]

第一量子化ハミルトニアン計算に向けた局在軌道の振幅エンコード

○西 紘史^{1,2}、小杉 太一^{1,2}、大門 俊介³、松下 雄一郎^{2,1,3} (1.Qumiex、2.東大、3.量研)

[16a-A33-10]

Robustness enhancement of spin-wave Ising machine via interference asymmetry

○Zhiqiang Liao¹, Md Shamim Sarker¹, Siyi Tang¹, Hiroyasu Yamahara¹, Munetoshi Seki¹,
Hitoshi Tabata¹ (1.Univ. of Tokyo)

[16a-A33-11]

量子アニーリングマシンを用いた複数移動体の制御

○庄司 尚斗¹、牛坂 紀英¹、江澤 遥¹、白樫 淳一¹ (1.東京農工大)

ナノ抵抗変化メモリ素子を用いたニューラルネットワークの スケールアウトへの展望

Prospects for Scale-out of Neural Networks Using Nano-resistive Change Memory Devices

北大院情報¹, 東京都市大² ○丸亀 孝生¹, (M1)楠瀬 黎¹, (M2)川合 遼一², 三谷 祐一郎²

Hokkaido Univ.¹, Tokyo City Univ.²,

○Takao Marukame¹, Rei Kusunose¹, Ryoichi Kawai², Yuichiro Mitani²

E-mail: takao.marukame@ist.hokudai.ac.jp

近年, 生成AIなどの進歩によって強く後押しされ人工知能(AI)およびニューラルネットワーク(NN)の研究が急速に進化している [1]. NN は人間の脳を数値モデルとした信号処理とアルゴリズムで構成され, NN のための低消費電力ハードウェアはインメモリーコンピューティング[2], ニューロモーフィック技術[3]などが注目されている. NN の学習ではシナプスの重みが繰り返し更新されるが, シナプスとして用いるのに有望なデバイスとして推論と学習に利用できるメモリスタまたはメモリストイブデバイスが検討されている[2, 3]. 例えば強誘電体トンネル接合 (FTJ) で構成された高効率の積和演算器 (MAC) が報告されている[2]. FTJ の電流-電圧 (I - V) 特性はナノオーダーの電流のため MAC として非常に低い消費電力で動作し, 演算速度を消費電力で割った演算効率指標では 100 TOPS/W オーダーの高い効率が示されている [2]. 一方, FTJ のようなメモリ素子はナノサイズで開発されているため, その重みの分解能は Flash メモリの分解能と同等あるいはそれよりも小さい場合がほとんどである. このため開発方針としては (1) 従来メモリ素子を超越する安定した多値を実現すること, (2) 多値を用いずに2値重みのバイナリニューラルネットワークを採用することが挙げられる (Fig. 1(a)) [3]. また FTJ のような抵抗変化素子はほとんどの場合で I - V 特性に非線形性を有しており, これを線形化するためには特別な信号処理あるいは入出力回路が必要となる (Fig. 1(b)). そこで今後新規開発されるべき抵抗変化素子はデバイス設計された段階から本質的な線形特性を有することが望ましい. また構造の最小単位がナノオーダーの材料による抵抗変化メモリ素子があれば将来の大規模化にとって望ましい [4].

従来の研究ではほとんどの場合, 試作時点では小規模な NN のデモンストレーションに留まっており, そこから実際の AI アプリケーションを動かすに至った例は非常に稀である. これを克服するためには新規の抵抗変化メモリ素子を動かすための共通的なハードウェアプラットフォームを構築するのが有望と考えられる. その実績ある方法としては Fig. 2 のように, まず電氣的・物理的に読み書き可能なナノ抵抗変化メモリ素子をパッケージ実装し, ある程度の規模を柔軟に接続する [2, 3]. そしてこれを外側のスイッチにて接続を切り替えながら電流あるいは電圧を素子に並列に印加して出力信号を得る. これらをマイコンにて制御し, ホスト機能のコンピュータが他のユニットと通信できるようにしておけば NN の規模を拡張できる. 講演会では上記プラットフォームにて期待できる AI アプリケーションと将来的なスケールアウトへの展望を議論する.

[1] A. Mehonic and A. J. Kenyon, *Nature* **604** (2022) 255.

[2] R. Berdan, T. Marukame, *et al.*, *Nature Electronics* **3** (2020) 259.

[3] T. Marukame, *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **59** (2020) 040606.

[4] R. Kawai, *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **63** (2024) 04SP05.

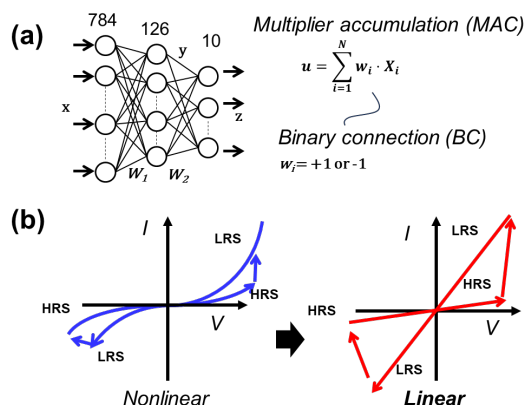


Fig. 1 Key points to implement emerging devices on NN hardware; (a) binary neural network architecture using multiplier accumulators (MAC) with conventional memristive devices (e.g. FTJ [1]), (b) nonlinear v.s. linear I - V curves of MAC (L/HRS: Low/High resistance states).

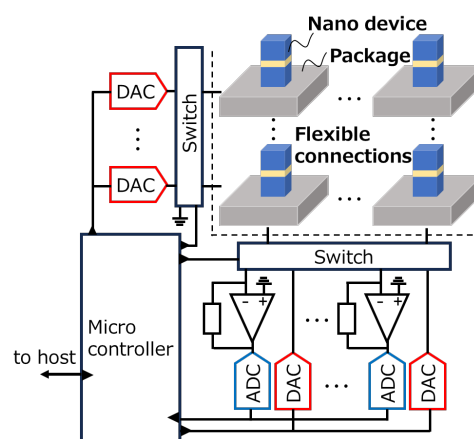


Fig. 2 A compact MAC system image of neural networks with resistance change devices including conventional memory and cutting-edge nano devices (e.g. nano-carbon [4]).

アナログメモリスタの線形・多段階抵抗レベル制御

Analog memristor pulse scheme for configuring linearity and multi-resistance level

阪大院基礎工¹、[○]Diao Zhuo¹、Meng Zijie¹、山本遼平¹、藤平 哲也¹、酒井 朗¹

Osaka University¹, [○]Zhuo Diao¹, Zijie Meng¹, Ryohei Yamamoto¹, Tetsuya Tohei¹, Akira Sakai¹

E-mail: diao.zhuo.es@osaka-u.ac.jp

人工ニューラルネットワーク (ANN) の技術が産業に大きな変革をもたらす時代において、AI 計算力を確保することは重要な戦略である。AI 計算力は主に high throughput で大量の積和演算を並列処理できる能力に依存する。それを実現させる計算デバイスには、CMOS 回路を基盤とする GPU や TPU 以外に、不揮発性を持ち非ノイマン型コンピュータの基幹素子として期待されるメモリスタがある。特に CMOS ベースのデバイスにける multi-bit の演算処理には複数のデジタルロジック素子が必要とされるが、メモリスタは単一素子でアナログ的な演算が可能であり、analog-to-digital converter(ADC) を組み込むことで従来の CMOS コンピュータと互換性を持つ。一方、Fig. 1(a) に示すように、多くのメモリスタは Potentiation/Depression 過程で非線形な抵抗変化挙動を示すことがあり、それが ANN 計算の精度を損なっている。よってメモリスタをアナログ的な AI 計算デバイスとして運用する際には、multi-bit に対応する複数の抵抗状態を確実に制御するための技術が必要となる。

本研究においては、メモリスタの低抵抗状態 (LRS) と高抵抗状態 (HRS) の間を線形かつ多段階の抵抗レベルに分ける抵抗変化の制御手法を開発した。本手法のコンセプトは、抵抗変化させる際に、読み出しで得られた抵抗 R に基づき、リアルタイムで次の書き込み電圧 V_w を決めることである [Fig. 1(b)]. $V_w(R)$ の値はデバイスに対する事前の calibration プロトコルで得られたデータを統計解析することによって求める。本手法のデモンストレーションとして 4 端子平面型 TiO_{2-x} メモリスタ^[1] の抵抗制御に適用した。その結果、Fig. 1(c) に示したように、LRS と HRS の間を均等に 64 個の抵抗状態に分けることができ、所定の V_w を複数回与えることで、任意の抵抗状態 (図中「★」で示す) に設定できる。さらに、抵抗レベルの数を浮動小数点の精度に対応付けることも可能であり、64(6 bits), 128(7 bits), 256(8 bits) の抵抗値に分けた Potentiation と Depression 結果を Fig. 1(d) に示す。当日は ANN 計算として用いた際の精度に対して、抵抗変化の線形性指標と multi-bit 数を合わせて議論する。

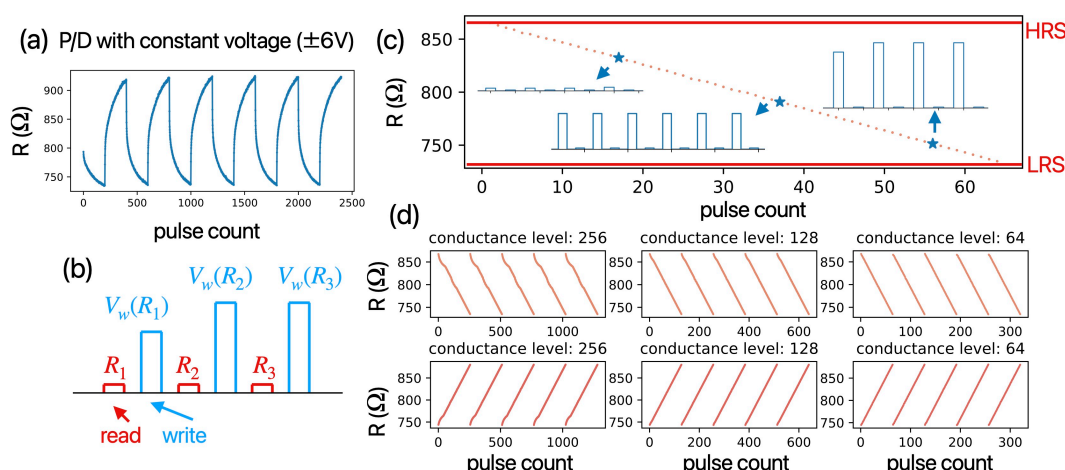


Fig. 1: 4 端子平面型 TiO_{2-x} メモリスタにおける抵抗制御. (a) 定電圧 (± 6 V) を印加した際の抵抗変化特性. (b) 考案した抵抗制御のための電圧パルス印加手法のコンセプトと (c) それによって作り上げた 64 個の抵抗状態. (d) Potentiation と Depression において、64(6 bits), 128(7 bits), 256(8 bits) の抵抗値に分けた結果.

[1] R. Miyake et al., *ACS Appl. Electron. Mater.*, 4, 5, 2326-2336(2022).

Online training of the energy harvester by using extreme learning machine

Kyushu Univ.¹, ° Yuxiang Wen¹, Takeaki Yajima¹

Email: wen@con.ed.kyushu-u.ac.jp

This research presents an innovative approach to power maximization for thermoelectric generators (TEG) utilizing an Extreme Learning Machine (ELM) and online training with Recursive Least Squares (RLS) [1]. The proposed system integrates a power management circuit capable of dynamically adjusting its switching frequency to optimize power output [2]. The ELM is trained to predict the output power of the power management circuit, enabling us to control the switching frequency for maximizing output power. This method allows for the adaptive tuning of the circuit's behavior to the varying conditions of the environment, ensuring efficient energy harvesting.

The ELM outputs the output power of the power management circuit based on the open-circuit voltage of the generator and the switching frequency of the power management circuit. The output weights of the ELM are trained by using the real output power of the power management circuit as teacher signals. The online training is adopted by using RLS, allowed for real-time adaptation to environmental changes and thereby improving energy harvesting efficiency. Based on this ELM, the switching frequency of the power management circuit can be quickly explored and optimized as shown in Fig. 1a.

The power maximization of the TEG system with ELM is demonstrated by Python simulation. Fig. 1b illustrates the output power of the power management circuit as a function of switching frequency for different open-circuit voltages of TEG. The black dots represent the real output power data and the red dots indicate the predicted power output generated by ELM. There is almost no discrepancy between the black dots and the red dots, demonstrating the accuracy of the ELM in predicting the performance of the power management circuit under different environmental conditions. This work was supported by VLSI Design and Education Center (VDEC), the University of Tokyo with the collaboration with CADENCE Corporation.

[1] Matias, T et al. *Journal of Process Control*, 27, 15-21. (2015).
 [2] Yajima, T. *Scientific reports*, 12(1), 1150. (2022).
 [3] Yang, H et al. *Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE)* (pp. 877-880). IEEE. (2018).

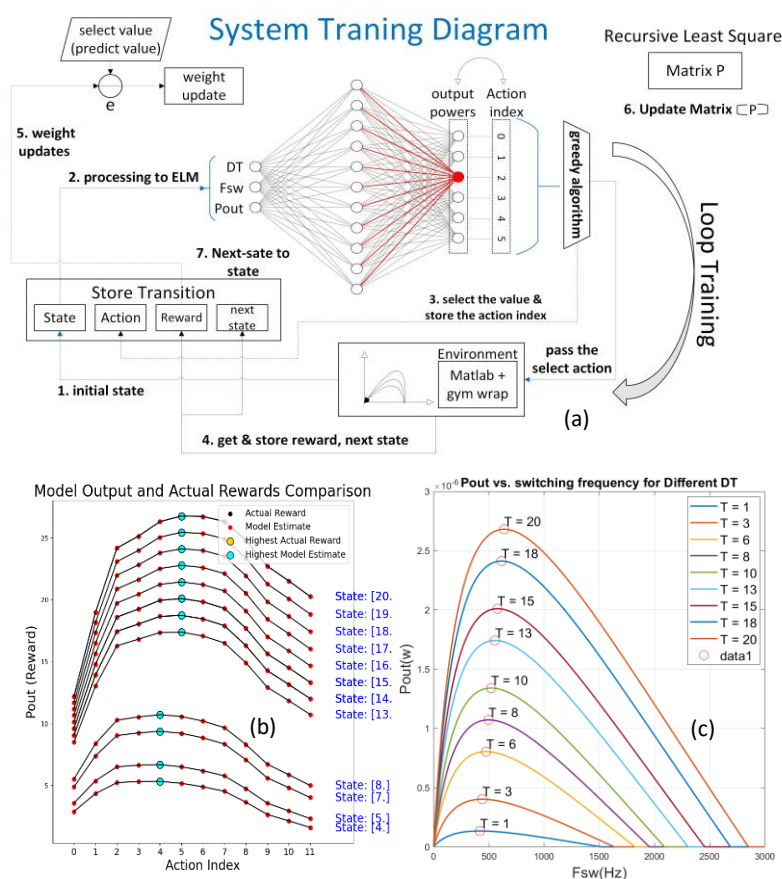


Fig. 1. (a) Overall system diagram. (b) Real and predicted power output from the actual TEG unit and power management circuit under various conditions. (c) The power output as a function of switching frequency under different temperature conditions for TEG unit, using a mathematical model [3].

ハイブリッドナノドットフローティングゲートメモリの短期記憶特性

Short-term Memory Characteristics of Hybrid Nanodots Floating Gate Memory

¹名大院工,²愛知工大 ^{○1}白 鍾銀,²田岡 紀之 ¹牧原 克典

¹Nagoya Univ., ²Aichi Inst. Tech. ^{○1}Jongeun Baek, ²Noriyuki Taoka, ¹Katsunori Makihara

E-mail: makihara@nuee.nagoya-u.ac.jp

序＞小数電子・小数光子を使って高度な知能情報処理を室温且つ高エネルギー効率で実現するために、半導体量子ドットや金属ナノドットを活用した研究が盛んに行われている。これまでに我々は、Si 量子ドットと金属シリサイドナノドットを高密度複合集積するプロセス技術を開発し、複合集積ドットをフローティングゲートに活用した MOSFET において、シリサイドナノドット内における多数電荷注入保持を確認すると共に、シリサイドナノドットへの電子注入が、Si 量子ドットの離散化準位を介して進行していることを明らかにしてきた[1]。本研究では、Si 系量子ドットフローティングゲートメモリの物理リザーブ応用を目的として、ドレイン電流(I_d)特性から短期記憶特性を評価した。

実験＞SiH₄-LPCVD による Si 量子ドットの形成とリモート H₂ プラズマ支援によるシリサイドナノドットの形成手法を用いて作製した PtSi ナノドット/Si 量子ドット積層構造をゲート酸化膜に組み込んだ n 型 MOSFET を用いた。尚、トランジスタのゲート長は 0.5 μ m、ゲート幅は 10 μ m である。

結果および考察＞ドレイン電圧 1.5V において、ゲート電圧を -10V から 10V まで電圧掃引(1.3V/s)した場合、チャネルからドットへの電子注入・保持に起因する明瞭なヒステリシスが認められ (Inset in Fig. 1)、最大メモリウィンドウ幅は~1.8V であった。

このトランジスタの短期記憶性を評価するため、ゲート電圧 -10V 印加によりドットの電荷を放出した後、ドレイン電流が流れ始める 3V を基準電圧として、高さ 7V(デューティ比 50%)のパルス電圧を重畳入力し(Fig. 1(a))、ドレイン電流の変化を評価した結果(Fig. 1(b))、パルス電圧にตอบสนองした電流変化が明瞭に認められた。次に、パルス幅を 1ms、読み出し電圧 6.5V で固定して、パルス入力数がドレイン電流に及ぼす影響を評価した結果(Fig. 2(a))、パルス入力数の増加に伴いドレイン電流が緩やかに減少することが分かった。これはパルス入力数によりドットへの電子注入が制御可能であることを示している。そこで、パルス電圧(幅 2ms)印加時を‘1’、印加していない時を‘0’とした 4bit の模擬パルスを入力し(Inset in Fig. 2(b))、4bit パルス列に対するドレイン電流を調べた結果、ドレイン電流は入力ビット列に対して離散的な値を取ることが分かった(Fig. 2(b))。この結果は、パルス電圧印加によるチャネルからドットへの電子注入・保持を制御することで、リザーブ演算に応用できることを示している。

結論＞Si 系量子ドットフローティングゲートメモリにおいて、ドットへの電子注入・保持をパルス信号入力により制御することで、短期記憶性が示されることが分かった。

文献＞[1] S. Miyazaki et al., *ECS Trans.* **58**, 231 (2013).

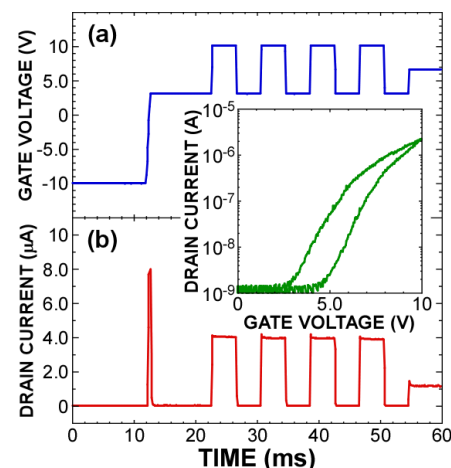


Fig. 1 (a) Typical applied gate-bias signals and (b) corresponding I_d of the hybrid-NDs FG-MOSFET. I_d - V_g characteristics of the FG-MOSFET is also shown in the inset.

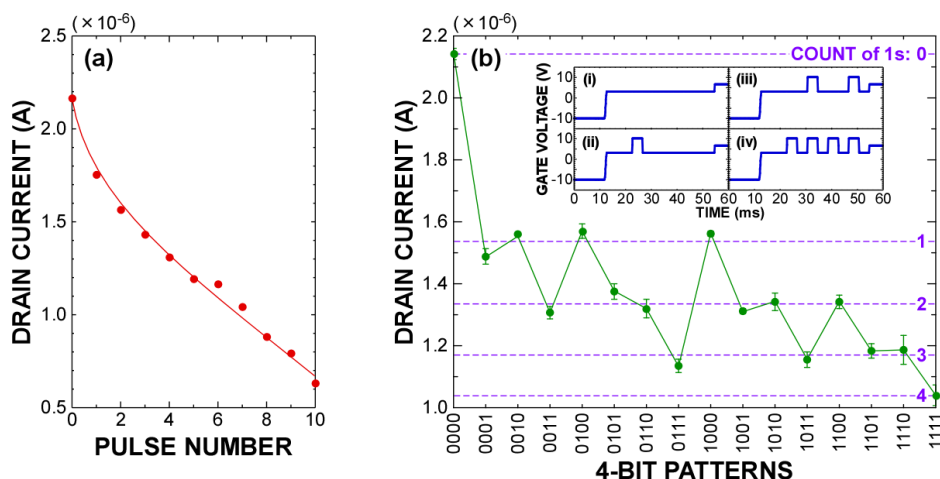


Fig. 2 (a) Change in the I_d as a function of pulse number, and (b) I_d taken after applying the 4bit pulse bias patterns. An example of 4bit pulse pattern such as (i) 0000, (ii) 0001, (iii) 1010, and (iv) 1111 are also shown in the inset in Fig. 2(b).

Cu イオン含有 PVA を抵抗変化層に用いた ReRAM の溶液濃度依存性

Solution concentration dependence of ReRAM using Cu ion-containing PVA as a resistance change layer

工学院大, °(M1) 岩澤 侑司, 小林 亮太, 永井 裕己, 相川 慎也

Kogakuin Univ., °Yuji Iwasawa, Ryota Kobayashi, Hiroki Nagai, Shinya Aikawa

E-mail: aikawa@cc.kogakuin.ac.jp

新産業の創出に向けて、ソフトエレクトロニクスの開拓が進められている。このようなデバイスのインテリジェント化には、高性能なフレキシブルメモリが不可欠であり¹⁾、抵抗変化メモリ(ReRAM)が適している。ReRAM は消費電力が低く絶縁体を金属で挟んだ簡易な構造(MIM 構造)のため、集積化が容易なためである²⁾。現状、フレキシブル ReRAM としては、絶縁体に金属化合物を用いたものが主に報告されている^{3,4)}。しかし、これらは曲げ安定性が乏しいなどの課題がある^{3,4)}。これに対して Bhansali らは、MIM 構造をすべて柔軟性のある有機物であるポリ(3,4-エチレンジオキシチオフェン)-ポリ(スチレンスルホナート)(PEDOT:PSS)に置き換えた ReRAM を報告したが、実用的なメモリ特性とは言い難い⁵⁾。これは、電圧印加により PEDOT と PSS が分解し、不可逆な抵抗変化になってしまうためだと考えられる。そこで、有機金属錯体による可逆的な酸化還元反応がメモリ特性に有効であるという Wang らの報告⁶⁾から着想を得て、ポリビニルアルコール(PVA)に硫酸銅(CuSO₄)を添加することで上記の問題が解決できると考えた。CuSO₄ は水溶性高分子と混ざることにより強い可逆的な酸化還元反応を示す⁷⁾。PVA は絶縁性材料であるとともに、水溶性高分子であることから⁸⁾、CuSO₄の酸化還元特性を活用できる。これらの混合により、高 ON/OFF 比で安定な有機ポリマーメモリの実現が期待できる。本研究では、CuSO₄/PVA の濃度比と ReRAM 特性の関係を調査した。

PEDOT:PSS(1.1 wt%, OrgaconICP1050)を IPA で 0.4 wt%まで希釈した。次に、PVA(重合度 1500, 和光純薬)と CuSO₄五水和物(純度 99.5%, 和光純薬)5H₂O を Table 1 に示す質量比で 0.4wt%の水溶液を調整した。下部電極として希釈 PEDOT:PSS をスピコートした後、CuSO₄/PVA をスピコートして 20nm の抵抗変化層を作製した。フォトリソグラフィでパターニングした後、PEDOT:PSS をスピコートして上部電極とした。最後に半導体パラメータアナライザで-3V~+3V の範囲を 300 mV/s で掃引し I-V 特性を測定した。

Fig. 1(a)に MR1 および 5 における典型的な ReRAM の I-V 特性を示す。作製した ReRAM の概略図を挿入図として示す。MR1 では急峻な抵抗変化が観測できた。これは、Cu イオンの酸化還元反応によるものと考えられる。Wong らは錯体内金属の酸化還元によって急激な抵抗変化が起こることを報告しており⁹⁾、その結果と矛盾しない。一方、MR5 での抵抗変化が急峻でなかったのは PVA のメモリスタの挙動であると考えられる⁸⁾。PVA 中の水酸基が電圧印加によって整列し、これに応じて抵抗変化が連続的に生ずるためである。MR5 では PVA 中の Cu イオン量が少ないことから、PVA 特性が見られたと推測する。

以上より、今回の作製条件では、MR1 デバイスが最適な条件であることが示された。また、Cu は PVA 中でイオン伝導することが想定されるため、測定温度や膜厚依存の結果について当日議論したい。

Reference

1) K. Xu *et al.*, Adv. Mater. Tech., 4, 3, 1800628 (2019)
2) 高相圭 *et al.*, J. Vac. Soc. Jpn., 56, 5, 176-178 (2013)
3) Y. Sun *et al.*, ACS Appl. Electron. Mater., 2, 2, 618-625 (2020)
4) D. Kumar *et al.*, IEEE Trans. Electron Devices, 67, 2, 493-498 (2020)
5) U. S. Bhansali *et al.*, ACS Nano, 7, 12, 10518-10524, (2013)
6) P. Wang *et al.*, J. Mater. Chem., 22, 9576-9583, (2012)
7) V. Azmeera *et al.*, Carbohydr. Polym., 110, 22 388-395, (2014)
8) Y. Lei, *et al.*, AIP. Adv., 4, 077105, (2014).
9) C. L. Wong *et al.*, Inorganic. Chemistry., 59, 20, 14785-14795, (2020)

Table 1 Mass ratio of prepared aqueous solution

Sample No.	PVA / CuSO ₄ (g)
MR1	1 / 1
MR2	10 / 1
MR3	100 / 1
MR4	1000 / 1
MR5	10000 / 1

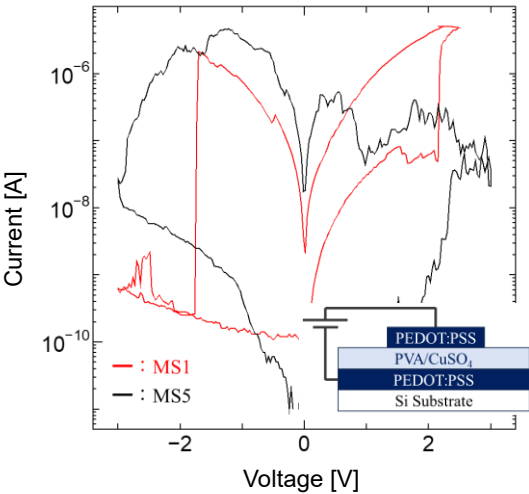


Fig. 1 Typical I-V characteristics of the fabricated ReRAM. The inset shows the schematic diagram of the device.

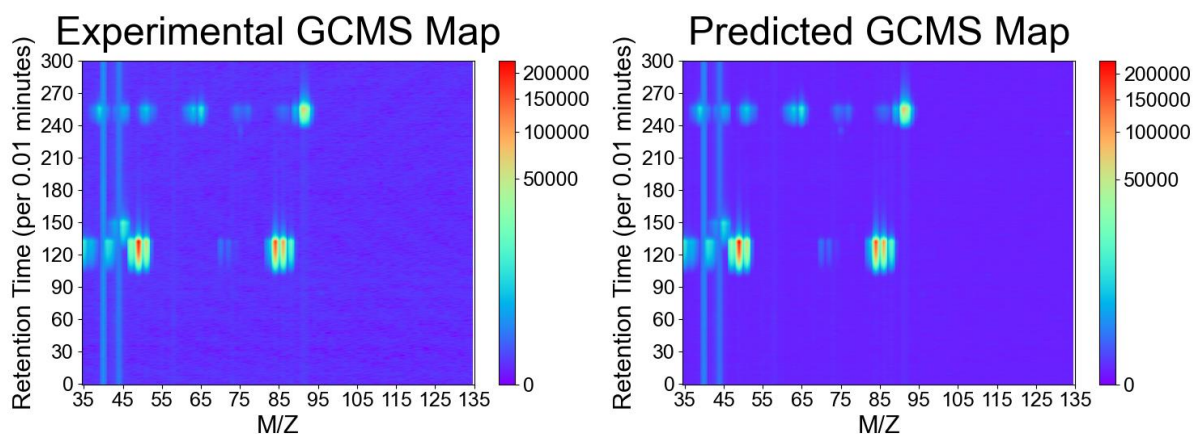
Study on correlation between GCMS mapping and QCM sensing signals for ternary gas mixtures.

Eng., The Univ. of Tokyo¹, Mi-6 Ltd², IMCE, Kyushu Univ.³

○ Oon pitipongsa Thanisorn¹, C. Jirayupat^{1,2}, W. Tanaka¹, T. Hosomi¹, T. Takahashi¹, and T. Yanagida^{1,3}

E-mail: thanisorn.2543@gmail.com

In the biomedical field, especially cancer prediction, researchers have identified multiple Volatile Organic Compounds (VOCs) as biomarkers for diseases using Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GCMS), while gas sensor arrays are claimed to differentiate these diseases with notable accuracy. This highlights a key question in gas sensor applications: is there a link between gas sensing signals and GCMS analysis profiles? In this study, we introduce a novel method that establishes a strong correlation between GCMS mapping and sensor signals, a long-standing gap in gas analysis, with machine learning techniques. We applied this method to ternary gas mixtures of ethanol, toluene, and dichloromethane with QCM gas sensors covered with 4 types of metal oxides. Utilizing Convolutional Neural Networks (CNN) and Principal Component Analysis (PCA), we successfully predict GCMS mapping from gas sensors signal with a remarkable average $R^2 = 0.98$ in stratified cross-validation and average $R^2 = 0.96$ in leave-one-out cross-validation. Furthermore, we employed CAM (Class Activation Mapping) and feature extraction approach for feature importance visualization of sensor signals, providing insights into the interaction between various gas species and sensor materials. This advancement not only proves the capability of gas sensors in distinguishing between different gas mixtures but also paves the way for enhanced gas mixtures' fingerprint studies in diverse applications such as disease diagnosis, environment management, industrial monitoring, and food and beverage quality determination.



量子リザーバーによる MNIST 分類性能の複数 NISQ デバイス間での網羅的評価

MNIST classification accuracies by quantum reservoir across multiple NISQ devices

東芝 研究開発センター¹, 東京大学 素粒子物理国際研究センター², [○]境隆二¹, 大羽秀明¹
中川英之¹, 上松和樹¹, 武口智行¹, 飯山悠太郎², 永野廉人², 澤田龍², 田中純一², 寺師弘二²

R&D Center, Toshiba¹, ICEPP Tokyo Univ.²,

[○]Ryuji Sakai¹, Hideaki Oba¹, Hideyuki Nakagawa¹, Kazuki Uematsu¹, Tomoyuki Takeguchi¹,

Yutaro Iiyama², Lento Nagano², Ryu Sawada², Junichi Tanaka², Koji Terashi²

E-mail¹: ryuji.sakai@toshiba.co.jp

NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum: ノイズのある中規模量子コンピュータ) デバイスを活用するには、ノイズ耐性のある量子アルゴリズムを巧妙に設計することが求められる[1]。量子機械学習は、量子コンピュータの有望な応用先の 1 つであり、パラメータ付き量子回路の学習[2]が提案されているが、ノイズのある NISQ デバイスではパラメータを最適化するのが困難である。

今回、量子回路のパラメータ学習を必要とせずノイズの影響を受けにくい量子リザーバー[3]を使って、複数の NISQ デバイス上で MNIST 分類の性能を網羅的に比較評価した。量子リザーバーにはパラメータをランダム値で固定したデバイス効率の高い量子回路を使い、量子回路の出力を古典線形モデルで分類する。評価には、MNIST データのサブセット 10,000/2,000 枚(学習/評価)を使った。QASM シミュレータの結果と、IBM クラウドサービスで提供される各 NISQ デバイス[4]の分類精度の結果を Fig. 1 に示す。行列の縦軸が訓練したデバイスであり、横軸がテストしたデバイスである。対角線の部分で、ノイズのある NISQ デバイスでも正解率が最高で 92.75%となり、QASM シミュレータの 94.5%に近い性能を得た。一方で、非対角成分のデバイスをクロスした場合には、分類精度が著しく劣化した。これは、異なるデバイス間のノイズの違い、特にリードアウトエラーの違いが影響していると考えられる。詳しい分析については講演で報告する。

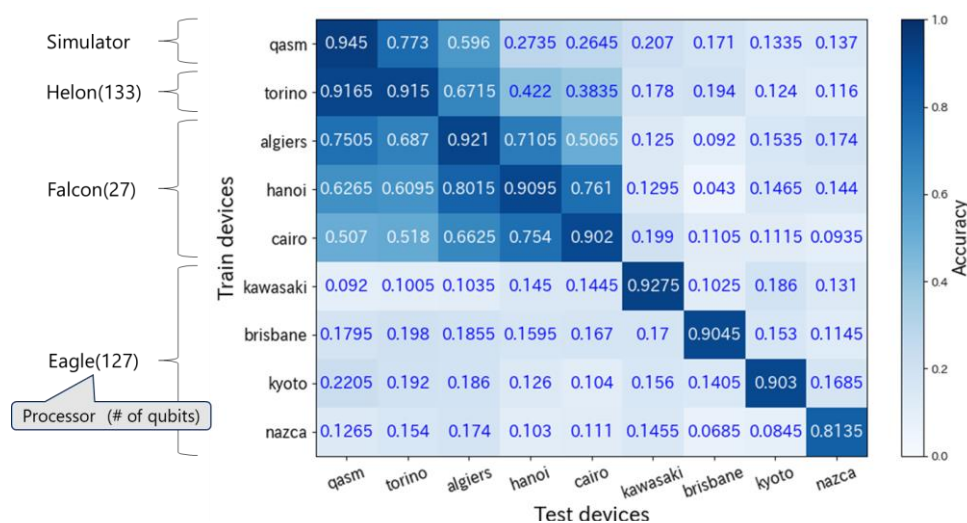


Fig. 1 Heat map of MNIST accuracy across training devices and test devices

[1] J. Preskill, Quantum Computing in the NISQ era and beyond, *Quantum*, 2018.

[2] Mitarai, K et al, Quantum circuit learning, *PhysRevA.98.032309*, 2018.

[3] Sakurai, A et al, Quantum extreme reservoir computation utilizing scale-free networks, *Phys. Rev. Appl.* 17, 064044, 2022.

[4] <https://quantum.ibm.com/services/resources>.

密度行列と最大混合状態の類似度による量子リザーバー回路の性能判定法

Circuit evaluation for quantum reservoir via similarity between output density matrix and maximally mixed state

東芝 研究開発センター¹, 東京大学 素粒子物理国際研究センター²,

◦大羽 秀明¹, 境 隆二¹, 上松 和樹¹, 中川 英之¹, 武口 智行¹,

飯山 悠太郎², 永野 廉人², 澤田 龍², 田中 純一², 寺師 弘二²

R&D Center, Toshiba¹, ICEPP Tokyo Univ.²,

◦Hideaki Oba¹, Ryuji Sakai¹, Kazuki Uematsu¹, Hideyuki Nakagawa¹, Tomoyuki Takeguchi¹,

Yutaro Iiyama², Lento Nagano², Ryu Sawada², Junichi Tanaka², Koji Terashi²

E-mail: hideaki1.oba@toshiba.co.jp

現在利用可能な量子コンピュータである Noisy Intermediate-Scale Quantum (NISQ) デバイスを用いた量子計算では、その計算過程で生じるノイズの影響を無視できない。NISQ 向けアルゴリズムの一種である量子リザーバー[1]は、リザーバーとして扱う量子回路に学習パラメータを含まないため、実機ノイズの影響を受けにくい特徴がある。しかし、量子リザーバー回路の候補は無数にあるため、NISQ 向けのアルゴリズムとして好適な回路構成の判定が望まれる。

我々はまず、量子リザーバー回路として好適な回路と不適な回路との違いを確認するため、6 qubit の簡易な量子回路で時系列回帰タスクの予測精度が良い回路と悪い回路の 2 種類を用意し、量子リザーバー回路の測定確率の振る舞いを観察した。時系列回帰タスクとして Nonlinear Auto-Regressive Moving Average (NARMA) タスク、予測精度指標として Normalized Root Mean Squared Error (NRMSE) を使用した。その結果、予測精度が悪い回路では時刻が進むにつれて出力時の全状態が等確率で測定されることが分かった。すなわち、出力時の密度行列を最大混合状態へと漸近させる回路は、量子リザーバーとして不適な回路であると考えられる。

そこで、密度行列が最大混合状態になると性能悪化することを利用し、最大混合状態と出力時の密度行列の類似度により量子リザーバー回路の良し悪しを判定する手法を提案する。定量的に最大混合状態と密度行列の類似度を評価するため、両者の差に対するフロベニウスノルムを指標とした。予測精度の良い回路と悪い回路に 100 通りの回転角パラメータを用意し、各回路における指標と NRMSE との関係を図に示す。図から、指標の大小によって量子リザーバーの性能の良し悪しを判定可能であることが分かる。密度行列の求め方やタスクによる判定への影響について講演で議論する。

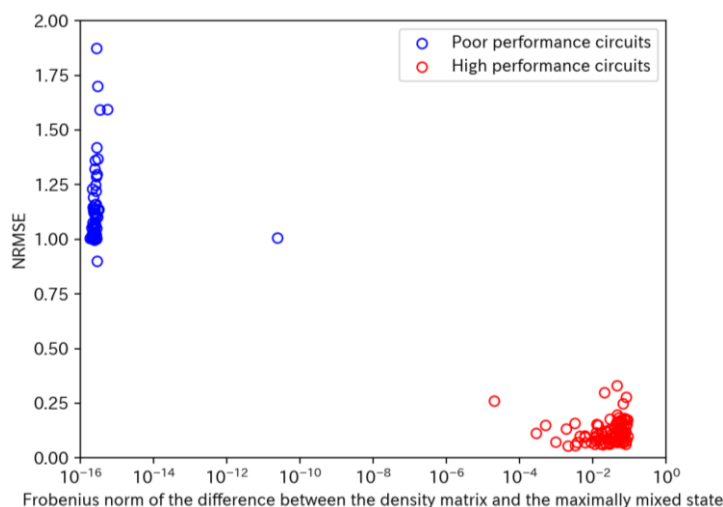


Figure. Relation between the Frobenius norm and NRMSE

[1] K. Fujii and K. Nakajima, Phys. Rev. Applied 8, 024030 (2017)

第一量子化ハミルトニアン計算に向けた局在軌道の振幅エンコード

Amplitude encoding of localized orbitals for first-quantized Hamiltonian calculation

Quemix¹, 東大², 量研³ [○]西 紘史^{1,2}, 小杉 太一^{1,2}, 大門 俊介³, 松下 雄一郎^{1,2,3}

Quemix¹, UTokyo², QST³, [○]H. Nishi^{1,2}, T. Kosugi^{1,2}, S. Daimon³, Y.-i. Matsushita^{1,2,3}

E-mail: hnishi@quemix.com

材料計算や金融、製造分野などの幅広い領域において量子計算機は古典計算機よりも効率的に問題を求解することが期待されている。量子アルゴリズムではしばしば初期状態が適切にエンコードされた量子ビット状態が既に準備されていることを前提している。例えば多体ハミルトニアンの基底エネルギーを求める量子位相推定では、基底状態との重なりが大きい初期状態が用意できた場合に限り古典計算機に対する指数的な加速を実現する。また、量子相の分類タスクにおける量子畳み込みニューラルネットワークでは、多体ハミルトニアンの基底状態の入力を前提とする[1]。任意の多量子ビット状態を準備する技術は振幅エンコードと呼ばれる。 n 量子ビットシステムは $O(2^n)$ の自由度を持つため、事前に決定された回路パラメータを使用して任意の状態をエンコードすることは、必然的に指数関数的な古典計算コストが必要である。しかし、特定の種類の問題に取り組む際には、一般的なエンコード技術の自由度は実際に使用する初期状態の自由度に比べて不必要に大きいことが推測される。

本研究では、局在関数の任意の線形結合を生成するエンコード技術を提案する[2]。離散スレータ関数を振幅エンコードする量子回路は効率的に実装することが知られており、これと量子フーリエ変換とユニタリの線形和の技術を統合することで局在関数の線形結合の振幅エンコードを達成する(Fig. 1(left))。この技術の量子リソースは量子ビット数 n_q に対して $O(n_q)$ の回路深さで見積もられた。我々の振幅エンコードは多様な分野に適用可能であり、特に、実空間における量子化学計算が有望な分野である。初期状態は通常、局在軌道の線型結合として表現される一電子分子軌道から構築されるためである。この問題における量子リソースを示す。最後に、IBM が提供する超伝導型の量子コンピュータ上での実行結果についても紹介する(Fig. 1(right))。

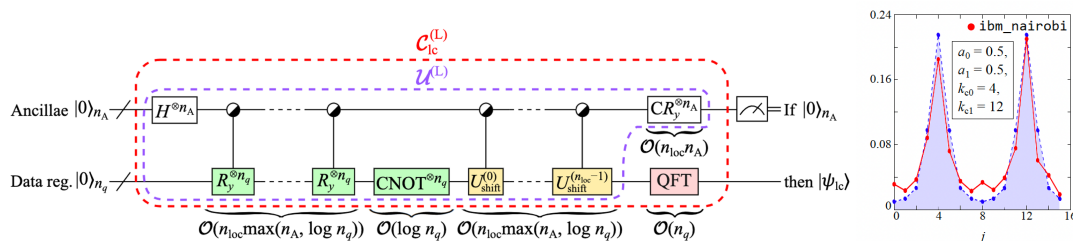


Figure 1: (left) Quantum circuit for amplitude encoding of the linear combination of localized functions.

(right) Observed probability on the encoded quantum state on (red) ibm_nairobi and (blue) ideal simulator.

[1] I. Cong, S. Choi, and M. D. Lukin, Nat. Phys, **15**, 1273 (2019). G. Budiutama, S. Daimon, H. Nishi, R.

Kaneko, T. Ohtsuki, and Y.-i. Matsushita, arXiv:2311.02871 (2023).

[2] T. Kosugi, H. Nishi, S. Daimon, and Y.-i. Matsushita, arXiv:2404.18529 (2024).

Robustness enhancement of spin-wave Ising machine via interference asymmetry

University of Tokyo, School of Engineering, [○]Zhiqiang Liao¹, Md Shamim Sarker¹, Siyi Tang¹,

Hiroyasu Yamahara¹, Munetoshi Seki¹, Hitoshi Tabata¹

E-mail: liao@bioxide.t.u-tokyo.ac.jp

Gain-dissipative Ising machines (GIM) is a faster optimizer compared to traditional computers, which balances gain and dissipation to stabilize the system and guide it toward the optimal solution [1]. However, all these traditional GIMs have to rely on noise perturbations to escape local minima due to the absence of quantum tunneling effects. On the other hand, real-world noise is difficult to control precisely, which can lead to performance degradation in GIMs [2].

To address the issue of weak noise robustness in traditional GIMs, we have designed a GIM architecture based on spin wave interferometer (SWI) with asymmetry. SWI leverages the propagation and interference effects of waves generated by the collective excitations of spins in magnetic materials, providing a low-energy information processing technology that does not produce Joule heat. Figure 1(a) shows a Y-shaped spin wave interferometer made from a yttrium iron garnet (YIG) with a thickness of 20 nm and a length of 400 μm . Figure 1(b) displays the curve of interference gain versus phase relationship under different conditions. It is clear that by adjusting the frequency, the interference gain can be in an asymmetric state without rotational symmetry.

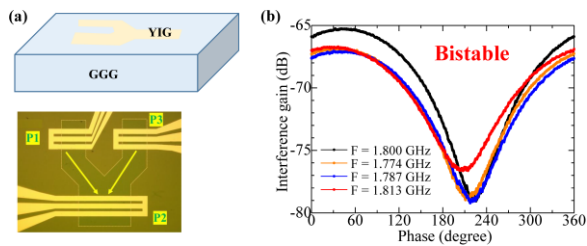


Figure 1 (a) The spin-wave interferometer based on single-phase YIG film. (b) Interference gain (dB) versus phase of the spin-wave interferometer. The nonlinearity shows periodic bistable.

Based on the interference nonlinearity, we constructed a simulation framework, as shown in Figure 2(a), to explore the performance of SWI-based GIMs. For benchmarking, the MAXCUT problems with Möbius ladder (ML) and random square lattice (RSL) topologies were employed. Figure 2(b) presents the performance of SWI-based GIMs under symmetric and asymmetric interference conditions when solving the ML benchmark in different noise environments. It can

be observed that the performance of the SWI-based GIM significantly degrades with increasing noise intensity, consistent with previous reports [3]. In contrast, SWI-GIM with asymmetric interference maintain an almost 100% success rate in solving the problems even at higher noise levels. For the RSL benchmark, SWI-based GIM with asymmetric interference also exhibit stronger noise robustness compared to those with symmetric interference, as shown in Figure 2(c).

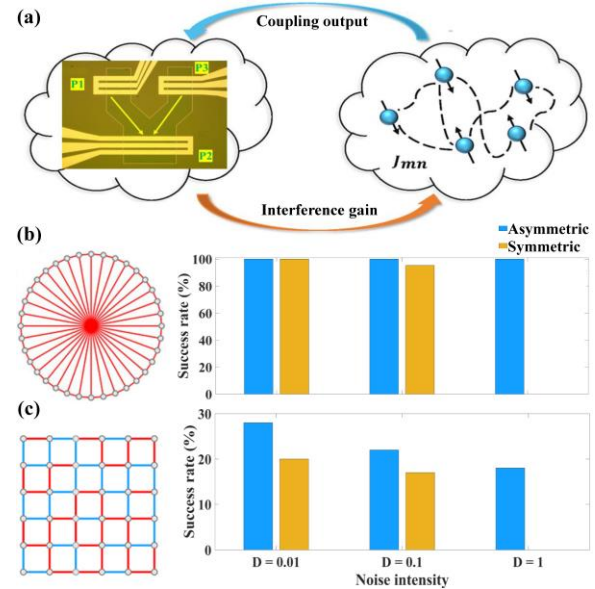


Figure 2 (a) Schematic of SWI-based GIM. Within the simulation framework, only SWI interference and spin coupling modules interact with each other. (b) ML topology and the success rate of SWI-based GIM on solving 100-spin ML. (c) RSL topology and the success rate of SWI-based GIM on solving 100-spin RSL. The gray vertices, red and blue edges represent spin, antiferromagnetic, and ferromagnetic connections, respectively.

In summary, the asymmetry effectively enhances the robustness of SWI-based GIM.

This research was partially supported by Institute for AI and Beyond for the University of Tokyo, JST-CREST (Grant Number JPMJCR22O2), AND JSPS KAKENHI (Grant Number 23KJ0605), Japan.

Reference:

- [1] Mohseni N., et al. Nat. Rev. Phys. 4.6 (2022): 363-379.
- [2] Fabian B., et al. Commun. Phys. 4.1 (2021): 1-11.
- [3] Liao Z., et al. Adv. Theory Simul. 5.3 (2022): 2100497.

量子アニーリングマシンを用いた複数移動体の制御

Controlling Vehicles Using Quantum Annealer

東京農工大 [○]庄司尚斗、牛坂紀英、江澤遥、白樫淳一

Tokyo University of Agriculture & Technology

[○]N. Shoji, N. Ushizaka, H. Ezawa, J. Shirakashi

E-mail: s245894y@st.go.tuat.ac.jp

量子アニーリングマシン[1]は、2011年にD-wave System社によって商用化されて以降、盛んに研究されている。量子アニーリングとは、量子効果を用いて問題の解を同時に探索する手法であり、他の古典的手法に比べ高速な解探索が可能であると考えられている。特に、大規模な組合せ最適化問題の解決に適しており、交通渋滞の解消[2]、ポートフォリオ最適化[3]、最近では無人搬送車の経路最適化[4]など、実社会の問題への応用が期待されている。今回は、量子アニーリングマシンを用いた3次元空間における複数移動体の制御を試みた。

本実験では、各移動体がランダムに割り当てられた目的地に到達することを目的とした。このとき、各移動体が衝突を避けながら最短経路を選択するように定式化を行った。まず、各移動体とその目的地をランダムに決定する。次に、移動体の位置から QUBO (Quadratic Unconstrained Binary Optimization) 問題[5]を作成する。その後、量子アニーリングマシンを用いて、移動体の経路を求める。最後に、得られた経路に基づいて移動体の位置を更新し、再び QUBO 問題を作成する。移動体が目的地に到達したら新たな目的地を設定する。この操作を繰り返すことで移動体の制御を行う。今回は、QUBO 問題の求解手法として Forward Annealing[4]、Reverse Annealing[4]、そして古典的な最適化手法である Simulated Annealing (SA)[6]を用いた。図1は問題の求解の様子を示している。 t はタイムステップを表し、 T はすべての移動体が目的地に到達したタイムステップである。 \times は移動体、 \bullet は目的地を示し、それぞれの色は対応する移動体と目的地を表している。(a) $t = 0$ はランダムに設定した初期状態、(b) $t = T/2$ は目的地に向かう途中で衝突を避けている状態、(c) $t = T$ は目的地に到達した状態を示している。今回は、評価指標として completed tasks を使用した。completed tasks とは、各移動体を規定回数操作したときに目的地に到達した回数の平均値を指す。8 台の移動体を 100 回操作するシミュレーションの結果、各々の completed tasks は、Forward Annealing では 163.4、Reverse Annealing では 158.2、SA では 162.6 となった。これらの結果から、古典的手法と同等の精度で量子アニーリングマシンによる複数移動体の制御が可能であることが示唆された。

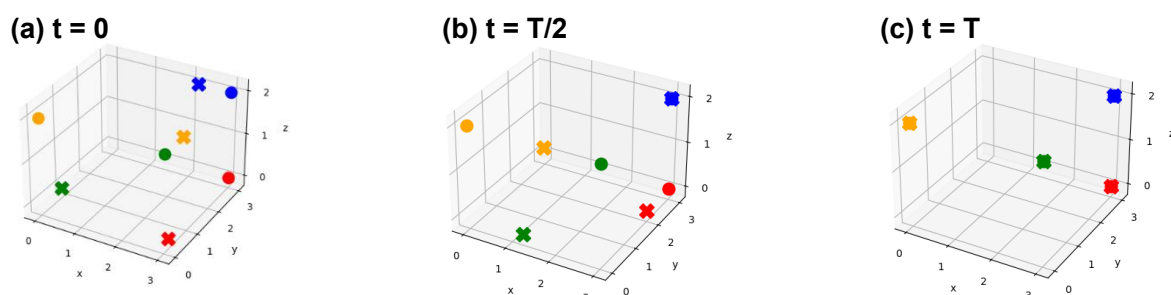


Fig. 1 Example of controlling vehicles. (a) Initial state with randomly placed vehicles and destinations, (b) All vehicles moving towards their destinations while avoiding collisions, and (c) All vehicles having reached their destinations.

References

- [1] M. W. Johnson, et al., Nature 473 (2011) 194.
- [2] F. Neukart, et al., Front. ICT, 4 (2017) 29.
- [3] G. Rosenberg, et al., IEEE J. Sel. Top. Signal Process., 10 (2016) 1053.
- [4] R. Haba, O. Masayuki, and T. Kazuyuki. Sci. Rep. 12 (2022) 17753.
- [5] A. Lucas, Front. Phys. 2 (2014) 5.
- [6] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt Jr., M. P. Vecchi, Science 220 (1983) 671.

FS フォーカストセッション「AIエレクトロニクス」 | 一般セッション(口頭講演): FS.1 フォーカストセッション「AIエレクトロニクス」

[16p-A33-1~16] FS.1 フォーカストセッション「AIエレクトロニクス」

PR

secret place

[16p-A33-1]

[分科内招待講演] 生物の神経回路に学ぶ省エネIoT技術

○矢嶋 赳彬¹ (1.九大シス情)

[16p-A33-2]

FPGA実装したスパイキングリザバーによるリアルタイム筆跡異常検知

○井上 悠¹、田村 浩人²、鬼頭 愛¹、チェン シャンユ³、ビャムバドルジ ゾルボー³、矢嶋 赳彬⁴、堀田 育志⁵、飯塚 哲也³、田中 剛平^{2,6}、井上 公¹ (1.産総研、2.東大IRCN、3.東大工、4.九大シス情、5.兵庫県立大工、6.名工大情)

[16p-A33-3]

液晶分子の配向変化を利用した物理リザバー動作

○水野 敦浩¹、長谷川 剛¹、永野 修作² (1.早大先進理工、2.立教大理)

[16p-A33-4]

Ag₂Sリザバーを用いた物体認識と異常検知に関する研究

○吉村 海輝¹、長谷川 剛¹ (1.早大院先進理工)

[16p-A33-5]

3次元硫化銀物理リザバーによる光文字認識

○大野 悠生¹、長谷川 剛¹ (1.早大先進理工)

[16p-A33-6]

Cu-doped Ta₂O₅ リザバーを用いた光照射パターンの分類

○早川 勝¹、長谷川 剛¹ (1.早大先進理工)

[16p-A33-7]

多段階コロイド液浸法で作製した金ナノ粒子集合体の液体窒素温度での物理リザバー動作

小林 海斗¹、林 優生¹、島田 宏¹、○水柿 義直¹ (1.電通大基盤理工)

[16p-A33-8]

クーロン閉塞を利用する金ナノ粒子リザバーの並列化による性能向上

○(M2)林 優生¹、小林 海斗¹、島田 宏¹、水柿 義直¹ (1.電通大基盤理工)

[16p-A33-9]

イオン液体物理リザバーデバイスの出力電流波形、データ次元、および機械学習性能の間にある潜在的関係性の主成分分析(PCA)による定量化

○久保 祐樹^{1,2}、宮本 峻佑³、島 久²、野上 敏材³、内藤 泰久²、秋永 広幸²、鄭 雨萌¹、木下 健太郎¹ (1.東理大先進工、2.産総研、3.鳥取大工)

[16p-A33-10]

三電極微小電気化学セルを利用したイオン液体物理リザバーデバイスの情報処理性能の起源解明

○久保 祐樹^{1,2}、宮本 峻佑³、島 久²、野上 敏材³、内藤 泰久²、秋永 広幸²、鄭 雨萌¹、木下 健太郎¹ (1.東理大先進工、2.産総研、3.鳥取大工)

[16p-A33-11]

イオン液体物理リザバーデバイスの動作電流揺らぎと非理想的入力信号への耐性

○島 久¹、久保 祐樹^{1,2}、宮本 峻佑³、野上 敏材³、内藤 泰久¹、秋永 広幸¹、鄭 雨萌²、木下 健太郎² (1.産総研、2.東理大先進工、3.鳥取大工)

[16p-A33-12]

スピン波のカオス的干渉のその場制御を用いた高精度カオス時系列予測

○並木 航¹、西岡 大貴¹、野村 優貴²、山本 和生²、寺部 一弥¹、土屋 敬志¹ (1.物質・材料研究機構、2.ファインセラミックスセンター)

[16p-A33-13]

スピン波干渉リザバーコンピューティングによる高精度カオス時系列予測

○(B)日笠 壮太^{1,2}、並木 航¹、西岡 大貴¹、樋口 透²、寺部 一弥¹、土屋 敬志^{1,2} (1.物質・材料研究機構、2.東理大理)

[16p-A33-14]

グラフェン/イオンゲル界面の電気二重層効果を利用する超高速動作イオンゲーティングリザバーの開発

○西岡 大貴¹、北野 比菜^{1,2}、並木 航¹、寺部 一弥¹、土屋 敬志¹ (1.NIMS、2.東理大)

[16p-A33-15]

グラフェンチャネルを用いた固体電気二重層トランジスタによる
物理リザバーコンピューティング

○(M2)北野 比菜^{1,2}、西岡 大貴¹、並木 航¹、寺部 一弥¹、土屋 敬志¹ (1.物質・材料研究機構、2.東理大)

[16p-A33-16]

グラフェン／ダイヤモンド接合型リザバーを用いた手書き数字認識

岩根 東輝¹、○植田 研二¹ (1.早大情シス)

生物の神経回路に学ぶ省エネ IoT 技術

Low-power IoT with neuromorphic technology

九大シス情 ○矢嶋 越彬

Kyushu Univ., °Takeaki Yajima

E-mail: yajima@ed.kyushu-u.ac.jp

IoT 化によって身近な空間で処理できる情報量が増えれば、クラウドのデータを減らすことができる。しかし無線センサノードやウェアラブルデバイスなど、身近な空間での情報処理には物理的制約が多く、限られた演算リソースと低消費電力性に特化した情報処理技術が求められる。その点、生物の神経回路には、身体という厳しい制約条件が課せられており、まさに限られた演算リソースと極限的な低消費電力性に特化した技術の宝庫だといえる。本発表では、神経回路の「センシング」と「制御」に着目し、速度、精度、汎用性を犠牲にして低消費電力性や機能性を実現する、身近な空間の特化した情報処理技術を紹介する。

センシング

ヒトの皮膚は優れた 2 次元センサシートだといえるが、これを従来の AD 変換に基づく技術で実現するのは難しい。大量の AD 変換に伴う電力-遅延トレードオフ、各センサへのアクセス制御、配線間のクロストークなど面倒な課題が多々発生する。一方でヒトの皮膚のセンサ（例えば温度センサ）は、ある特定の温度で急激に開閉するイオンチャネルによって温度の 2 値判別に近いことをしており、配線間クロストークも、消費電力と遅延時間のトレードオフも、自然と解消される。このような、精度を犠牲にした single-bit センシングによって、優れた 2 次元センシングを実現する技術は、工学的に大変興味深い。このような考えのもと、温度に対して電気抵抗が 0/1 変化する金属絶縁体転移材料 (VO₂) に着目し、材料の 0/1 応答をデジタル回路と併用することで、優れた 2 次元センシングを実現できることを示す。さらに相転移の大きな自由エネルギー変化のため、VO₂ がゼロエネルギーでも高速な温度応答を示すことが明らかとなり、高速かつ低消費電力な 2 次元センシングが可能であることを示す。

制御

今日の優れた制御技術の一つにデジタル制御があるが、高速なクロック信号を常時使用することから低消費電力化には限界がある。例えば、微弱な電力を生成する環境発電の電源回路制御には、ナノワットレベルの低消費電力性が求められるため、デジタル制御が利用できない。これに対して、神経回路では複数のニューロンからなる「パターン生成回路」が固有のリズムパターンで筋肉を伸縮させることで、歩行、呼吸、嚥下などの複雑な動きを生成している。このようなリズム制御のいいところは、クロック信号と異なり必要な時に必要な場所だけ動かすことで、極限的な低消費電力性を実現できることである。このような考えのもと、アナログ CMOS 回路で超低消費電力 (~1pW) なニューロン回路を設計し、環境発電の電源回路制御に応用できることを示す。

FPGA 実装したスパイキングリザバーによるリアルタイム筆跡異常検知

Realtime handwriting anomaly detection using an FPGA-based spiking reservoir

産総研¹ 東大 IRCN² 東大工³ 九大シス情⁴ 兵庫県立大工⁵ 名工大情⁶

○井上 悠¹, 田村浩人², 鬼頭 愛¹, シャンユ チェン³, ビャムバドルジ ソルボ³,
矢嶋赳彬⁴, 堀田育志⁵, 飯塚哲也³, 田中剛平^{2,5}, 井上 公¹

AIST¹, Univ. Tokyo (IRCN)², Univ. Tokyo (Dept. Engineering)³,
Kyushu Univ.⁴, Univ. Hyogo⁵, Nagoya Inst. Tech.⁶

○Hisashi Inoue¹, Hiroto Tamura², Ai Kitoh¹, Xiangyu Chen³, Zolboo Byambadorj³,
Takeaki Yajima⁴, Yasushi Hotta⁵, Tetsuya Iizuka³, Gouhei Tanaka^{2,6}, Isao H. Inoue¹

E-mail: hisashi.inoue@aist.go.jp

リザバーコンピューティングは時系列データの処理を得意とするニューラルネットワーク技術で、低消費電力な情報処理技術として注目を集めている。この中で特徴量の抽出を担うリザバーは、非線形応答を持つ多数のノードのランダムなネットワークで構成される。より具体的には、少数の素子を時間分離して多数のノードとして用いる仮想ノードリザバー、又は素子とノードを1対1で対応させるネットワークリザバーとして構成される。前者は、ノードが持つ情報を一時的に外部に記憶させる必要があるが、後者はリザバー自体がメモリとなって情報を保持するため、情報伝達によるエネルギーロスが少なく、低消費電力動作に有利である。さらに、ノードが出力する信号の形式として、アナログ値ではなく、タイミングや周波数といった時間情報を用いるスパイキングリザバーとして構成することで、更なる消費電力の削減が期待できる[1]。

今回我々は、FPGA を用いたデジタル回路でスパイキングリザバーを構成して、異なる人が書いた図形の筆跡を判別する、筆跡の異常検知の実証実験を行った。Figure に、デジタル回路のビヘイビア・モデルでシミュレーションを行った結果を示す。まず、A さんの書いた三角形の筆跡で、教師有り学習を行う。その上で、B さんの書いた三角形の筆跡を入力すると、リザバーの内部状態から算出される異常スコアが大きな値をとることがわかる。今度は、再び A さんの別の筆跡を入力すると、異常スコアは 100 倍程度小さくなることから、筆跡の異常検知が成功しているのがわかる。発表では、FPGA の実機で筆跡の異常検知を行った結果、筆跡の異常検知精度、消費電力について議論する。

[1] X. Chen *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **122**, 074102 (2023).

謝辞：本研究は JST-CREST (JPMJCR19K2) の支援を受けて得られた成果です。

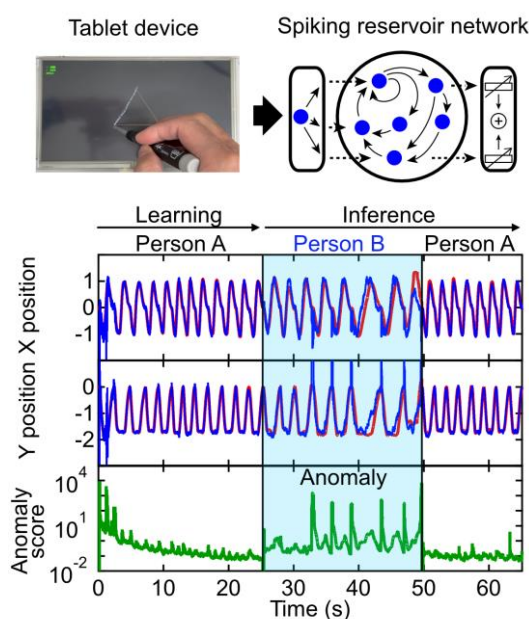


Figure: Handwriting anomaly detection using a spiking reservoir network and its detection result.

液晶分子の配向変化を利用した物理リザーバー動作

Physical Reservoir Operation Utilizing Polarization Change in a Liquid Crystal

早大先進理工¹, 立教大理² [○](M2)水野 敦浩¹, 長谷川 剛¹, 永野 修作²

Waseda Univ.¹, Rikkyo Univ.², [○]Atsuhiko Mizuno¹, Tsuyoshi Hasegawa¹, Shusaku Nagano²

E-mail: baseballmizuno1@akane.waseda.jp

はじめに：液晶分子膜の誘電率は配向によって決まり，その配向の向きは電場によって制御できることが広く知られている。この電場応答を利用することで，物理リザーバーに要求される非線形変換特性と短期記憶特性を液晶分子膜で実現できる可能性がある。本研究では，液晶分子として8CB（4-Cyano-4'-n-octylbiphenyl）を用い，この検証実験を行った。

実験方法：8つの電極が数十 μm のギャップを介して中央の円形電極に接続された素子を作製した(**Fig.1**)。続いて，基板を 50°C に加熱してギャップを含む円形領域に8CB分子を滴下した後，徐冷した。1つの電極に入力電圧を印加し，残った電極のうち，3つの電極で出力波形を測定した。

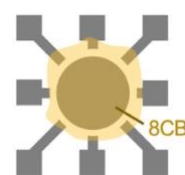


Fig.1 Used device.

実験結果：正弦波および三角波を入力した場合の入出力波形（一部）を **Fig.2** に示す。いずれの場合も，10Hz～1 kHz の周波数領域で入力波形が大きく非線形変換されて出力された。これは，電極間ギャップ近傍の液晶分子膜の誘電率（配向）が電圧印加によって変化していることを示唆している。これに対して10kHzでは，出力波形は入力波形に近い形状となった。これは，入力の周波数が液晶分子配向の応答速度と同等以上になったためと思われる。**Fig.3** に短期記憶タスクの実験結果を示す。短期記憶容量は1kHzで最大値(3.06)を示した。この値は，同様の条件で測定した硫化銀アイランドリザーバーの値(3.91)[1]よりは小さい。しかし，t-SNEを用いた出力ベクトルの分布(**Fig.3b**)は5ビット列の分類が明確に行えることを示しており，分子膜厚や電極間隔，印加電圧などの最適化によって短期記憶容量のさらなる向上も期待できる。現在，配向変化の可視化に向けた準備も進めており，当日は動作メカニズムに関する考察も含めて発表する予定である。

[1] Y. Shimizu et al., Jpn. J. Appl. Phys. 62, SG1001 (2023).

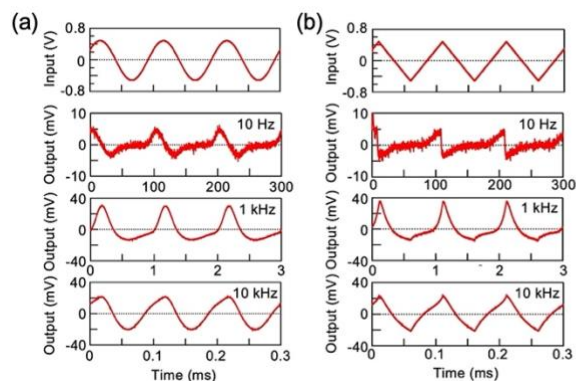


Fig.2 Frequency dependence of output with input of (a) sine wave and (b) triangular wave.

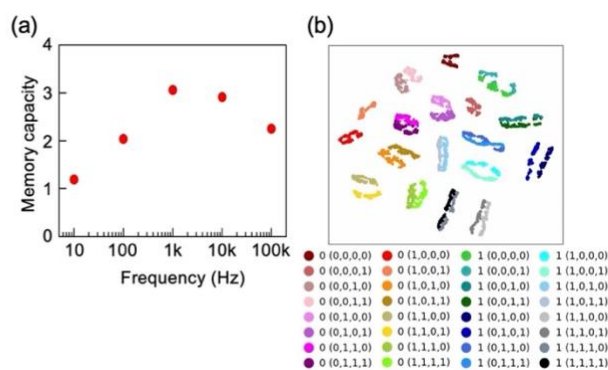


Fig.3 Result of STM task. (a) Memory capacity and (b) distribution of outputs analyzed by t-SNE.

Ag₂S リザーバーを用いた物体認識と異常検知に関する研究

Research on object recognition and anomaly detection using Ag₂S reservoir

早大先進理工 ○(M2) 吉村 海輝, 長谷川 剛

Waseda Univ., °Kaiki Yoshimura, Tsuyoshi Hasegawa

E-mail: yoshi-kaiki-4869@toki.waseda.jp

はじめに：近年、AI 技術の進展により、AI ロボットの開発が飛躍的に進んでいる。AI ロボットに求められる技術の一つに、正確な物体の認識がある。これまでに我々も、ロボットアームと Ag₂S リザーバーを用いて、触覚情報による 5 種類の物体認識とその異常検知が可能であることを報告した[1]。本研究では、さらなる精度向上を目指して、Ag₂S リザーバーを用いた物理リザーバーコンピューティング (PRC) と畳み込みニューラルネットワーク (CNN) による触覚および視覚情報のマルチモーダル処理を導入した。これにより、10 種類 (Fig.1(a)) の物体認識を目指した。また、リザーバー出力を処理する回路を作製し、把持物体の異常検知をリアルタイムで行うことを目指した。

実験方法：視覚情報処理は、カメラで取得した物体画像を CNN を用いて分類することで行った。触覚情報処理は、2 つの圧力センサーを取り付けたロボットアームで物体を掴み、センサーから出力される時系列データを Ag₂S リザーバーに入力、PRC による分類で行った。これらの視覚と触覚の情報を適切な割合で統合することで、マルチモーダル処理を行った (Fig. 1(b))。

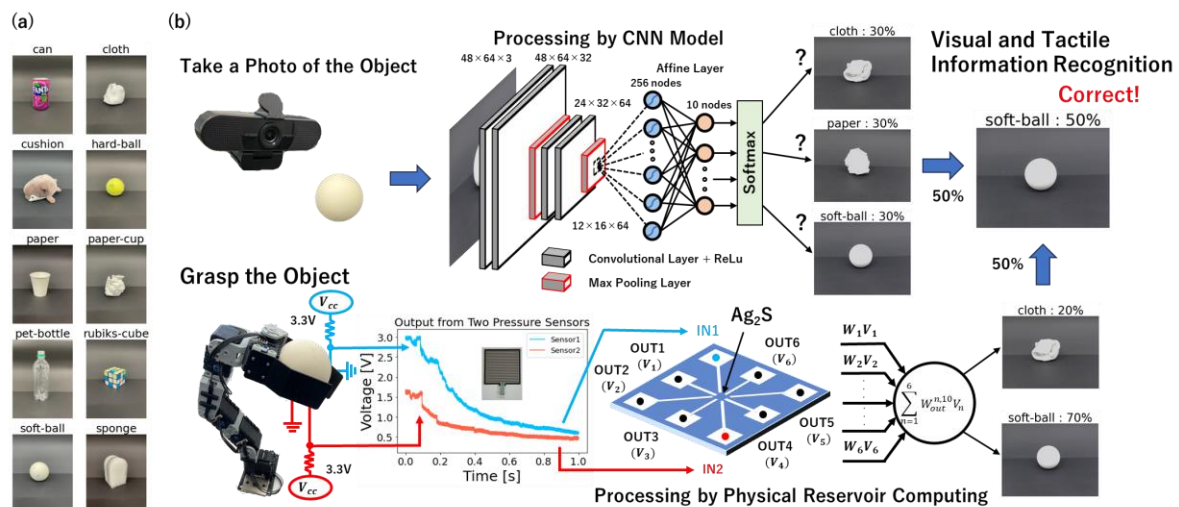


Fig. 1. (a) Objects used for the classification. (b) Experimental diagram of object recognition.

結果：物体認識の結果を Fig. 2 に示す。横軸は視覚と触覚情報の割合を表しており、触覚情報のみの分類では平均 84.28% の精度、視覚情報のみの分類では平均 92.76% の精度、マルチモーダル処理による分類では適切な割合において、平均 97.12% の精度を達成した。視覚、触覚情報のみでは誤認識が起きる物体をお互いの情報で相互に補い合うことができた。

当日は、異常検知の実験結果も含めて詳細に報告する。

【参考文献】 [1] K. Yoshimura et al., Jpn. J. Appl. Phys., 63, 03SP17 (2024).

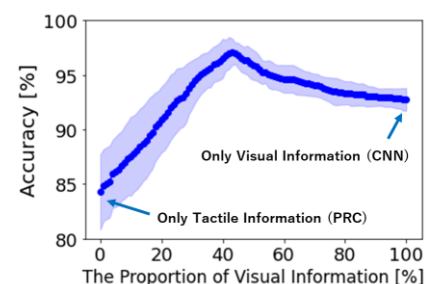


Fig. 2. Object Recognition Results

3次元硫化銀物理リザーバーによる光文字認識

Optical character recognition using three-dimensional silver sulfide physical reservoir

早大先進理工¹ ○(M2)大野 悠生¹, 長谷川 剛¹

Waseda Univ., [○]Yuki Ohno, Tsuyoshi Hasegawa

E-mail: yuki777ohno@fuji.waseda.jp

はじめに：近年物理リザーバーの様々な応用例が報告されている。その内の一つに、リザーバー層に直接照射した光文字認識タスクがある[1, 2]。また、リザーバー層を立体化することで短期記憶容量が増大することも報告されている。前回我々も、硫化銀微粒子を用いた3次元リザーバーが2次元リザーバーよりも高い短期記憶容量とパリティチェック機能を示すことを報告した。本研究では3次元硫化銀リザーバーを用いて光文字認識を行い、3次元リザーバーの新たな活用法を検討した。

実験方法：スチレンボード上に4枚のカバーガラスで仕切りを立て、その内側に硫化銀の結晶を敷き詰めることで3次元硫化銀物理リザーバーを作成した。このリザーバーの異なる2つの側面にメタルマスクを使って文字の形にした白色光を照射する (Fig. 1(a))。4つの側面の中心付近に配置した電極のうちの1つに振幅10V、周波数1000Hzの正弦波を100周期分入力し、残りの3つの電極で出力電圧を測定した。入力電圧の正負のピークから一定量位相がずれた時刻で出力電圧を抽出し、3電極合計で6出力を学習に用いた。学習では、光照射なし・HH・XX・UU・VVの5パターンの分類を行った。

結果と考察：Hの光文字を2つの側面から照射した場合の入力波形と3つの出力波形を Fig. 1(b)に示す。電極によって出力波形が異なっている。Fig. 1(c)には1つの出力電極で測定した各照射パターンの平均電圧を示す。光照射パターンの違いによって出力電圧が異なっている。このような多様性は学習精度の上昇につながる。これらの測定データを用いて光文字認識を行った結果を混同行列で Fig. 1(d)に示す。本研究では5パターンの分類で90%以上の精度を実現した。また現段階では2つの側面から同じ種類の光文字を照射しているが、今後は異なる光文字を照射した場合においても分類を行い、当日はそれも含めて発表する。

参考文献

[1] Y. Shimizu et al., Jpn. J. Appl. Phys., **62**, SG1001 (2023).

[2] R. Matsuo and T. Hasegawa, Jpn. J. Appl. Phys., **63**, 03SP61 (2024).

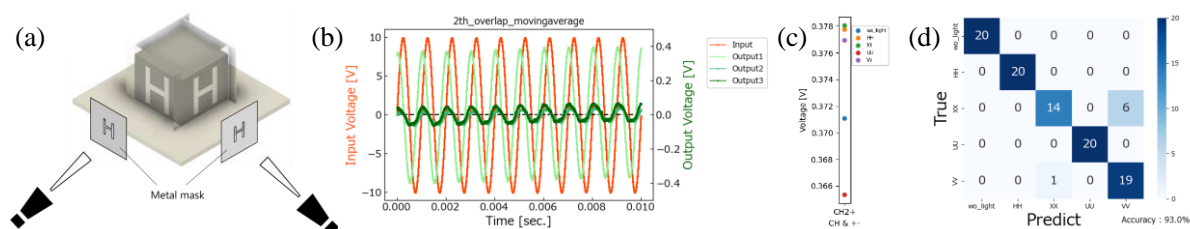


Fig. 1 (a) Schematic of an optical character recognition system with 3-dimensional Ag₂S reservoir. (b) Input and output waveforms when H-shaped optical characters are illuminated. (c) Average voltage measured with each pattern at one electrode. (d) A confusion matrix of the optical character recognition.

Cu-doped Ta₂O₅ リザーバーを用いた光照射パターンの分類 Classification of irradiated light patterns using a Cu-doped Ta₂O₅ reservoir

早大先進理工 ○(M2) 早川 勝, 長谷川 剛

Waseda Univ., °Masaru Hayakawa, Tsuyoshi Hasegawa

E-mail: pbmsue-49-ntg@suou.waseda.jp

はじめに：これまでに我々は Ag₂S などの固体電解質を用いた物理リザーバーで、リザーバー層に直接照射した光パターンを電圧信号に変換せずに入力信号として扱えることを報告してきた[1]。

Cu-doped Ta₂O₅ はドーパントである Cu 原子が不純物準位を形成することで半導体として機能する。このため、Cu-doped Ta₂O₅ をリザーバー層に用いれば、Ag₂S 同様、光信号の直接検出が可能であると期待される。そこで本研究では、Cu-doped Ta₂O₅ リザーバーが光の検出機能を有するか、さらには、照射した光パターンの分類がその向きを変えても可能かの検証実験を行った。

実験方法：SiO₂ 基板上に直径 8 mm の円形領域を囲むように 8 つの電極(Au(100nm)/Ti(5nm))を作製し、その円形領域に混合ターゲットを用いて Cu-doped Ta₂O₅ を 22nm スパッタ蒸着した。光照射にはハロゲンランプを使用し、アルファベット H,X,U,V の 4 つの文字パターンを金属スリットを通してリザーバー層に照射した。出力電圧を得るために正弦波の電圧信号も入力した。

結果・考察：Fig. 1 に H,X,U,V の 4 つの照射パターンの分類タスクを行った結果を示す。Fig. 1(a) の混同行列は 5 回の交差検証の内 1 回の結果を示しており、5 回の平均で正答率は約 99% となった。Fig. 1(b)に正弦波のピーク時刻における出力電圧の平均値と標準偏差を示す。バラツキはあるが、照射パターンに依存して振幅が異なっている。ピーク時刻に加えて、その前後の時刻の出力も含めた出力ベクトルの分布を t-SNE で解析した結果、照射パターン毎にリザーバーからの出力の特徴も異なっていることが示された(Fig. 1(c))。また、スリットの向きを 90 度ずつ回転させた場合でも回転させない場合と同じ文字として認識できるかどうか調べた。この場合はパターン数が多いため精度が低下したものの、約 78%の精度を示した。複数のパターンを順番に照射した場合の照射順を検出することも目指しており、当日はその結果も併せて報告する。

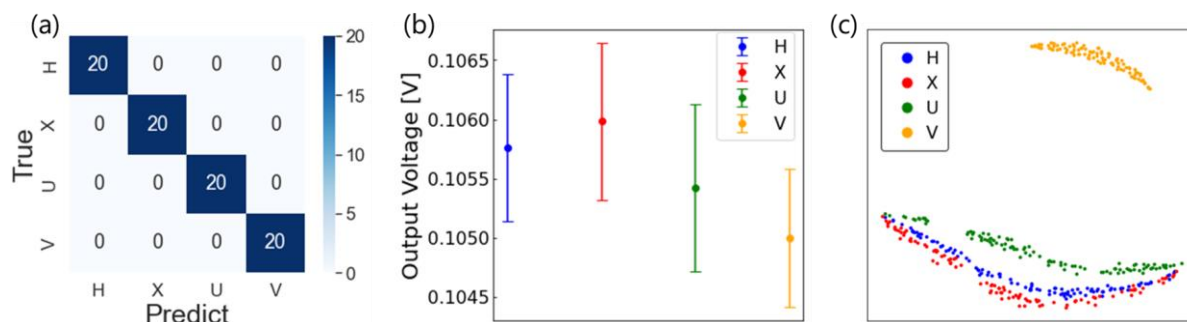


Fig. 1 Results of classification task of irradiated light patterns. (a)Confusion matrix of true label and output label. (b)Mean value and standard deviation of output from one electrode. (c)Clustering map by t-SNE analysis.

参考文献 [1]R. Matsuo et al., Jpn. J. Appl. Phys. 63, 03SP61 (2024).

多段階コロイド液浸法で作製した金ナノ粒子集合体の 液体窒素温度での物理リザーバー動作

Physica Reservoir Made of Random Network of Gold Nanoparticles Operated in Liquid Nitrogen Bath

電通大院 情報理工 小林 海斗, 林 優生, 島田 宏, ○ 水柿 義直

Grad. School Informatics and Engineering, The Univ. of Electro-Communications (UEC Tokyo)

Kaito Kobayashi, Yuki Hayashi, Hiroshi Shimada, and ○Yoshinao Mizugaki

E-mail: y.mizugaki@uec.ac.jp

はじめに 我々は金ナノ粒子 (GNP) 集合体の物理リザーバー応用に関する研究を行っている。昨年, 30 nm 径 GNP コロイドでの多段階液浸法によって作製した6端子素子について, 液体ヘリウム温度での特性を報告した [1]。今回, 端子数を12に増やすとともに, 15 nm 径 GNP コロイドを混合することで集合体内 GNP の帯電エネルギーを増加させ, 液体窒素温度での特性について報告する。

実験方法 酸化膜付き Si 基板上に電子線リソグラフィー (EBL) と真空蒸着を用いて12本の金電極を作製した。これらの金電極は, それらの端部が直径約 $1\ \mu\text{m}$ の円周上に配置されるようにレイアウトした。次に, 電極上に直径約 $3\ \mu\text{m}$ の円形レジスト穴を EBL により設けた。この試料を金コロイド溶液中に3回液浸し金ナノ粒子集合体を作製した。用いた金コロイド溶液は, 1回目は直径 15 nm, 2回目は直径 15 nm と 30 nm の混合, 3回目は直径 15 nm と 30 nm および 50 nm の混合液とした。最後に, レジストとそれに付着した GNP をリフトオフで除去した。測定では, 液体窒素温度にて, 1つの端子に交流電圧を印加し, 他端子の電圧を出力として観測した。

結果 Fig. 1 に作製した試料の SEM 像を示す。Fig. 2 に1つの入力と9つの出力電圧波形を示す。これらを利用して, 物理リザーバーの応用タスクの一つである任意波形生成を行った結果を Fig. 3 に示す。ターゲット波形によっては99%の精度が達成されており, 物理リザーバーとして機能したことが分かる [2]。

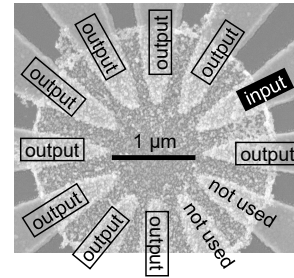


Fig. 1: SEM image of a fabricated random network of gold nanoparticles with 12 electrodes.

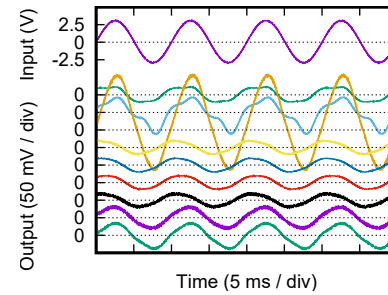


Fig. 2: Output waveforms for a 100Hz, 6 Vpp sinusoidal input voltage measured at 77 K.

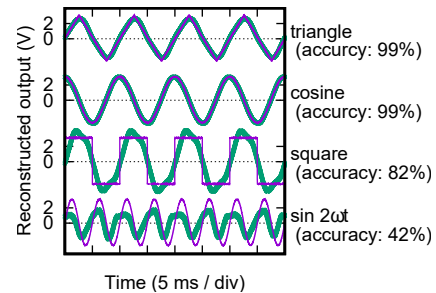


Fig. 3: Results of the waveform reconstruction tasks using an echo-state-network scheme.

謝辞 本研究の一部はJSPS 科研費 JP20H02201 の助成のもと行われた。

[1] 小林他, 第 84 回応物秋季講演, 20p-P04-3, 2023. [2] K. Kobayashi, et al., Jpn. J. Appl. Phys. **63** (2024) 064501.

クーロン閉塞を利用する金ナノ粒子リザーバーの並列化による性能向上

Improved performance of the Coulomb-blockade-based gold-nanoparticle reservoirs connected in parallel

電通大基盤理工 ○(M2) 林 優生, 小林 海斗, 島田 宏, 水柿 義直

Department of Engineering Science, The Univ. of Electro-Communications (UEC Tokyo),

°Y. Hayashi, K. Kobayashi, H. Shimada, Y. Mizugaki

E-mail: y-hayashi@mizugaki.es.uec.ac.jp, y.mizugaki@uec.ac.jp

1. はじめに

リザーバーコンピューティング (RC) の中核となるリザーバー層を, 様々な物理デバイスで置き換えた物理リザーバーが注目されている[1]. 我々は, 金ナノ粒子 (GNPs) ランダム配列を物理リザーバーとして用い, 用いる端子数やナノ粒子の粒径によって性能が変化することを検証してきた[2][3]. GNPs ランダム配列の非線形性はトンネル伝導のクーロン閉塞を起源とするものである. 本研究では, 複数の端子を持つ GNPs リザーバーを並列化することで性能向上を図った.

2. 実験方法

酸化膜付き Si 基板上に, 半径約 300 nm の円周上に端部が配置された 6 個の金電極を電子線リソグラフィと真空蒸着により作製した. SiO₂ 表面上に GNPs を固定するために基板表面をシラン化させ, 粒径 15 nm の金ナノ粒子コロイド溶液に液浸させた. その後, ナノ粒子および金電極表面を 1, 10-デカンジチオール単分子膜で修飾させ, 再びコロイド溶液に液浸させることで GNPs ランダム配列が形成された. 本研究では, 1 チップ上に 2 つの素子 (Reservoir1 と Reservoir2) を作製した (Fig. 1). Fig. 2 に並列構成の概略図を示す. 素子を液体窒素中 (77 K) で冷却した後, 共通の入力信号を各リザーバーの 1 端子に入力し, それぞれ他端子からの出力電圧をオシロスコープにて測定した. 本研究では, 入力電圧のパルス間隔を変化させ, 単一リザーバーそれぞれ, および 2 リザーバー並列時の NARMA2 モデルの時系列予測を行い, 予測誤差を比較した.

3. 実験結果

Fig. 3 に単一リザーバーのみ, および並列構成にした場合の予測誤差を示す. 単一リザーバーの結果と比較すると, どのパルス間隔においても並列構成のほうが Normalized mean square error (NMSE) が小さくなり, パルス間隔 0.25ms にて NMSE は 0.132 となった. 並列構成にて NMSE が小さくなったのは, 多様な応答を利用できるためだと考えられる.

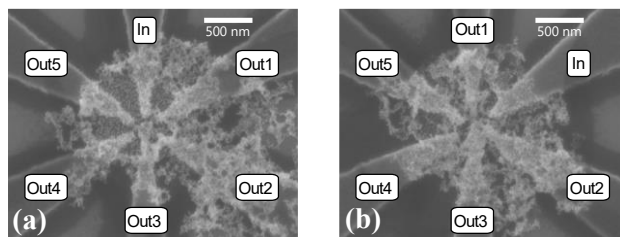


Fig. 1 SEM images of GNPs random arrays with 6 electrodes. (a) Reservoir1, (b) Reservoir2.

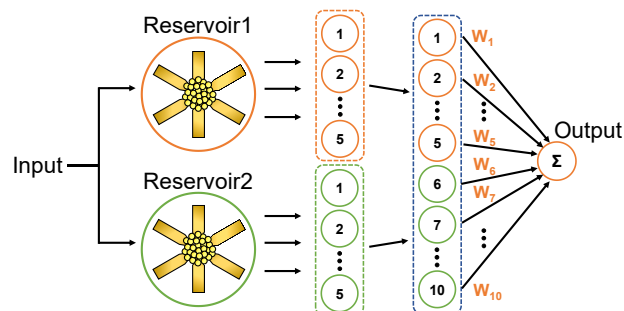


Fig. 2 Schematic diagram of two GNPs reservoirs in parallel configuration.

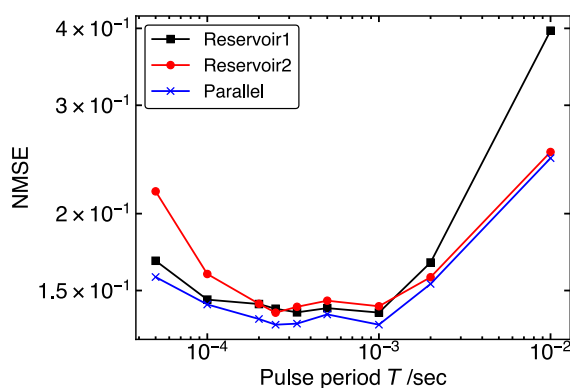


Fig. 3 NMSE values of the NARMA2 task for different reservoir configurations.

謝辞 本研究の一部は, JSPS 科研費 JP20H02201 の助成のもと行われた.

参考文献 [1] G. Tanaka, et al., Neural Networks. **115** (2019) 100. [2] 林他, 第 71 回応用物理学会春季学術講演会, 23a-P09-1 (2024). [3] K. Kobayashi, et al., Jpn. J. Appl. Phys. **63** (2024) 064501.

イオン液体物理リザーバードバイスの出力電流波形、データ次元、および機械学習性能の間にある潜在的関係性の主成分分析(PCA)による定量化 Quantification of Potential Relationship between Output Current Waveforms, Data Dimensionality, and Machine Learning Performance in Ionic Liquid-Based Physical Reservoir Device Demonstrated via PCA

東理大先進工¹, 産総研², 鳥取大工³

久保 祐樹^{1,2}, 宮本 峻佑³, 島 久², 野上 敏材³, 内藤 泰久², 秋永 広幸², 鄭 雨萌¹, 木下 健太郎¹

Tokyo Univ. of Sci.¹, AIST², Tottori Univ.³

Y. Kubo^{1,2}, S. Miyamoto³, H. Shima², T. Nokami³, Y. Naitoh², H. Akinaga², Y. Zheng¹ and K. Kinoshita¹

E-mail: 8423519@ed.tus.ac.jp

[序論]省電力性と高い計算性能を両立できる機械学習(ML)モデルとしてリザーバーコンピューティング (RC)が注目されている. RC 内のリザーバー層は物理デバイスで置き換えることも可能であり, このようなデバイスは物理リザーバーデバイス (PRD)と呼ばれる. 近年, 様々な PRD の研究が精力的に行われており, 我々はこれまでイオン液体 (IL)/電極界面で生じる電気化学反応を利用した物理リザーバーデバイス(IL-PRD)[1-3]の研究を進めてきた. これまでの研究で印加電圧などの動作制御パラメータと ML 性能の関係を評価し, IL/電極界面上での酸化還元反応に伴うファラデー電流が物理リザーバー出力の非線形性を高め, 性能を向上させることを明らかにした[1, 2]. 本研究では, PRD の設計指針を確立するため, 出力信号のデータセット自体の特性に着目した[3]. IL-PRD から出力された電流信号に主成分分析(PCA)に基づく低ランク近似を適用し, 次元制御された電流波形を再構築して ML 性能を調べた. これにより, 電流波形形状と ML 性能の関係について定量的な評価を行った.

[実験方法] 本研究で用いた素子の構造を Fig. 1 に示す. IL は 0.4 M の $\text{Cu}(\text{Tf}_2\text{N})_2$ を添加した $[\text{C}_4\text{mim}][\text{Tf}_2\text{N}]$ である. この素子に“1”と“0”から成る仮想的な時系列データ $u(T)$ を入力した. ここで, 正と負の三角波パルス電圧 (電圧 ± 3.0 V, パルス幅 500 ms)をそれぞれ“1”と“0”と定めた. $u(T)$ を入力して測定した出力電流データを仮想ノード法 (仮想ノード数は 50)で高次元化し, 電流データ行列 \mathbf{I}_{Raw} を作成した. この行列に PCA を適用し, ランク数 (R)を 1~50 まで系統的に変化させた電流データ行列 $\mathbf{I}(R)$ を再構築した. その後, $\mathbf{I}(R)$ を学習に用いた際の ML モデルの性能を調べるため, STM タスクの記憶容量(MC)および NARMA2 タスクの正規化平均二乗誤差 (NMSE)と R の関係を評価した. その際, いずれのタスクにおいても訓練データは $\mathbf{I}(R)$ とし, テストデータは \mathbf{I}_{Raw} に固定した.

[結果及び考察] Fig. 2(a)および 2(b)は $\mathbf{I}(1)$ および $\mathbf{I}(10)$ を基にプロットした I - V 曲線である. 正電圧範囲のみを表示している. また, $u(T)$ のうち“00001”の順で電圧信号が入力された際の電流波形を淡緑および淡青色とし, それぞれの電流波形の平均値 $\mathbf{I}_{\text{Ave}}(R)$ の波形を緑および青色の太線で表した. Fig. 2(b)の赤線は $\mathbf{I}_{\text{Ave}}(10)$ と $\mathbf{I}_{\text{Ave}}(1)$ の差 $\Delta \mathbf{I}_{\text{Ave}}(10, 1)$ である. Fig. 2(a)に示すように $\mathbf{I}(1)$ にはヒステリシス形状や 1.0 V 付近のピーク形状など, 元々の \mathbf{I}_{Raw} の電流波形(データ示さず)が有するおおよそその特徴が含まれている. Fig. 2(b)の $\mathbf{I}(10)$ の波形はほぼ \mathbf{I}_{Raw} の波形と同様であり, $10 < R$ では波形形状に殆ど変化は無かった. Fig. 2(b)の右軸の $\Delta \mathbf{I}_{\text{Ave}}(10, 1)$ に着目すると, R の増加に伴って, 特に 2.0 V 付近で電流波形のピーク形状が明瞭になる変化が見られた. また, Table 1 に STM タスクの MC 値および NARMA2 タスクの NMSE と R の関係をまとめた. $1 \leq R \leq 10$ ではどちらのタスクにおいても ML 性能が向上し, $10 < R$ で飽和した. これらの結果は, ファラデー電流による電流ピークなど, 電流の非線形成分によってデータが高次元化され, それに伴って ML 性能が向上することを示している. 本研究により, 高性能な PRD の設計に向けて PCA と低ランク近似で次元制御しながら再構築したデータセットを ML 性能評価に利用する新たな評価方法が提示された. この評価方法により, IL-PRD から出力される電流波形とデータの次元性, そして, それらの ML 性能への影響が包括的に示された.

[参考文献] [1] T. Matsuo *et al.*, *ACS Appl. Mater. Interface*. **14**, 36890 (2022). [2] D. Sato *et al.*, *ACS Appl. Mater. Interface*. **15**, 49712 (2023). [3] Y. Kubo *et al.*, *IEEE Access*. under review.

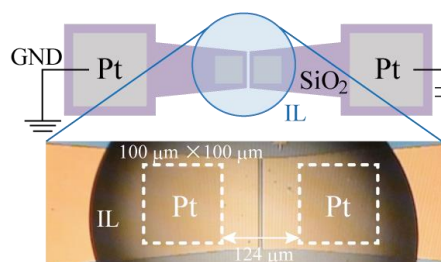


Fig. 1 Schematic view (upper) and micrograph (lower) of IL-PRD.

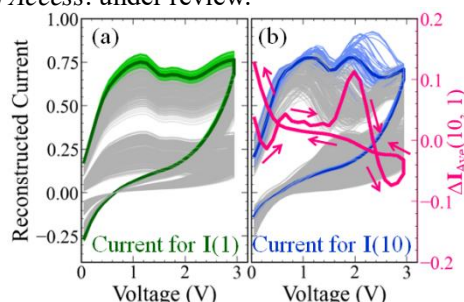


Fig. 2 Reconstructed current waveforms of (a) $\mathbf{I}(1)$ and (b) $\mathbf{I}(10)$ and $\Delta \mathbf{I}_{\text{Ave}}(10,1)$.

Table 1. R dependence of STM and NARMA2 task performance.

R	MC value for STM task	NMSE for NARMA2 task
1	0.5089	47.62
2	0.9021	7.513
4	1.343	3.823
10	1.831	0.1438
50	1.860	0.1436

三電極微小電気化学セルを利用した イオン液体物理リザーバードバイスの情報処理性能の起源解明 Origin of Information Processing Performance in Ionic Liquid-based Physical Reservoir Device Revealed by Three-Electrode Micro-Electrochemical Cell

東理大先進工¹, 産総研², 鳥取大工³

久保 祐樹^{1,2}, 宮本 俊佑³, 島 久², 野上 敏材³, 内藤 泰久², 秋永 広幸², 鄭 雨萌¹, 木下 健太郎¹

Tokyo Univ. of Sci.¹, AIST², Tottori Univ.³

Y. Kubo^{1,2}, S. Miyamoto³, H. Shima², T. Nokami³, Y. Naitoh², H. Akinaga², Y. Zheng¹ and K. Kinoshita¹
E-mail: 8423519@ed.tus.ac.jp

[序論] エッジコンピューティングでは情報処理の省電力性と高い計算性能の両立が求められる。この要件を満たす情報処理技術として物理リザーバードバイス (PRD)の開発が進められている。我々はこれまでイオン液体(IL)/電極界面で生じる電気化学反応を利用した物理リザーバードバイス(IL-PRD)[1,2]の開発を進めてきた。より具体的には1入力1出力の2電極(2E)素子を用いて IL-PRD の電気特性や機械学習(ML)性能の評価を行っており、IL/電極界面上での酸化還元反応によって生成される非線形なファラデー電流が ML 性能を向上させることを明らかにした[1,2]。一方、2E 測定であるため両側の電極間で酸化反応と還元反応が同時に起こり、生成された電流波形に対するそれぞれの反応の寄与を判別することは困難であった。そこで本研究では、酸化と還元をそれぞれ区別して解析できる3電極(3E)測定を用いて ML 性能を評価した。その結果、酸化反応が還元反応に比べて、より顕著な電圧履歴を示すことが分かった。酸化反応の持つこの特徴が ML において重要な役割を果たすこと、また、2E 測定ではどちらかの電極で常に酸化反応が生じるため 3E 測定より情報処理性能が高いことが示唆された。

[実験方法] Fig.1 は本研究で用いたマイクロ電気化学セルである。白色点線で囲まれた領域は Pt 電極であり、面積は $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ である。2E 測定では作用電極(WE)と対向電極(CE)のみを使用した。3E 測定では(擬似)参照電極(RE)も使用した。IL は $0.4\ \text{M}$ の $\text{Cu}(\text{TF}_2\text{N})_2$ を添加した $[\text{C}_4\text{mim}][\text{TF}_2\text{N}]$ を用いた。この素子に“1”と“0”がランダムに並んだ信号を仮想的な時系列データ $u(T)$ として入力した。ここで“1”と“0”はそれぞれ正と負の三角波パルス電圧とした。掃引速度を $1\ \text{V/s}$ に固定し、電圧は 3E 測定では $\pm 1.5\ \text{V}$, 2E 測定では $\pm 3.0\ \text{V}$ とした。得られた出力電流信号を仮想ノード法で高次元化し、 $u(T-T_{\text{delay}})$ を教師データとする STM タスクを実行し、ML 性能を評価した。

[結果と考察] STM タスクの性能指標である Memory Capacity (MC)値は 3E 測定と 2E 測定でそれぞれ 1.047, 1.877 であり、2E 測定の方が 3E 測定と比べ高い値を示した。3E 測定と 2E 測定のそれぞれの測定条件において、 $u(T)$ を入力して生成された電流波形を Fig. 2(a)および(b) に示した。これらの図では 2 タイムステップ前までの信号の入力順(クラス)に基づいて電流波形を色分けしている。2E 測定では電圧極性に対して対称的な電流波形であるが、3E 測定では電圧極性に対して非対称な電流ピークが観測されることに加え、還元反応と比べ酸化反応の過程では電圧印加履歴に依存して波形がより顕著に変化する。そこで酸化反応と還元反応の特徴抽出能力を比較するため、Fig2(a)のデータに主成分分析を適用して第 1, 第 2 主成分の二次元データに次元削減したうえで、クラス分類精度をサポートベクターマシンで評価した。波形の類似度が高い 2 つのクラス間での分類精度は、酸化反応の信号が含まれる“111”と“011”, “101”と“001”はそれぞれ 79.8%, 79.2%であった。一方、還元反応の信号が含まれる“000”と“100”, “010”と“110”の分類精度はそれぞれ 78.5%, 56.4%であり、分類が困難な信号を多く含んでいた。よって、還元側よりも顕著な電圧履歴を示す酸化側の電流波形が分類に有効であることが分かった。酸化反応で電圧履歴が観測される要因として、電極表面に形成された Cu 化合物によって Pt による Cu の酸化溶出が抑制されていることが考えられる。故に、IL-PRD を構成する電極、溶質、そして副次的な生成物等の各材料が IL 中で示す酸化還元電位に着目してデバイスを設計することで、ML のタスクに応じてその学習精度を最大化できる最適な電流波形の生成が可能になると期待される。2E 測定の方が 3E 測定と比べ MC が高い理由は、高い分類精度を与える酸化反応が 2E ではどちらかの電極で常に生じるためと考えられる。

[参考文献] [1] T. Matsuo et al., *ACS Appl. Mater. Interface*. (2022). [2] D. Sato et al., *ACS Appl. Mater. Interface*. (2023).

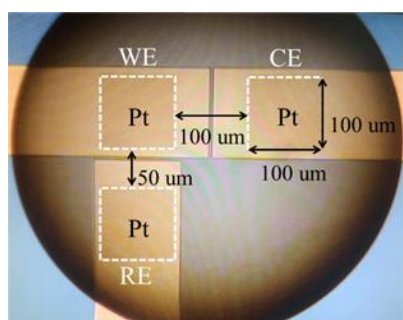


Fig. 1 Optical microscope image of 3 electrode micro-electrochemical cell.

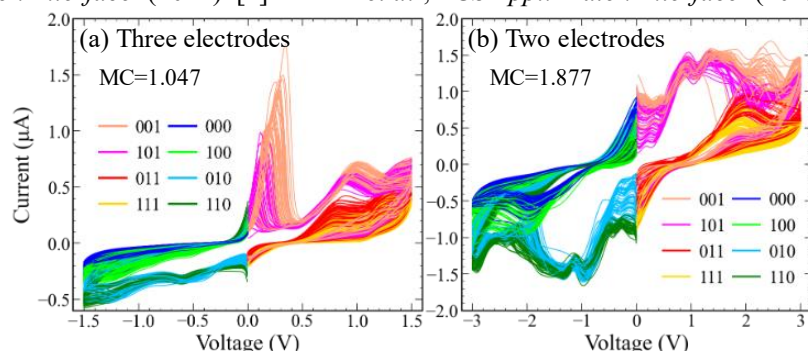


Fig. 2 Color-coded output current waveforms measured by applying random binary data stream in (a) 3E and (b) 2E configuration.

イオン液体物理リザーバーデバイスの動作電流揺らぎと非理想的入力信号への耐性

Operating Current Fluctuation of Ionic Liquid-based Physical Reservoir Device and Robustness for Non-ideal Input Signal

産総研¹、東理大先進工²、鳥取大工³○島 久¹、久保祐樹^{1,2}、宮本峻佑³、野上敏材³、内藤泰久¹、秋永広幸¹、鄭 雨萌²、木下健太郎²AIST¹, Tokyo Univ. of Sci.², Tottori Univ.³○H. Shima¹, Y. Kubo^{1,2}, S. Miyamoto³, T. Nokami³, Y. Naitoh¹, H. Akinaga¹, Y. Zheng², and K. Kinoshita²

E-mail: shima-hisashi@aist.go.jp

【序論】物理リザーバー計算(PRC)は、省電力性と高い計算性能を兼ね備えた情報処理が要求されるエッジ領域において、機械学習(ML)による情報処理を実装するための有力な手法として研究されている。エッジ領域で生成される信号は一般に信号の形状や大きさが一定ではなく、経時変化やノイズのような非理想性を有する。よって、PRCでリザーバー層を担うデバイスには、信号の非理想性への耐性が求められる。我々はイオン液体(IL)と電極界面で起こる電気化学反応を利用した物理リザーバーデバイス(IL-PRD)の研究開発を進めており、これまでに電極サイズやデバイス動作を行う雰囲気がIL-PRDによるPRCのML性能に与える影響などについて報告してきた[1, 2]。エッジ領域で生成される信号と同様にIL-PRD自体もその動作性能に非理想性がある。例えば、同一条件の電圧をIL-PRDに入力して出力される電流値には揺らぎがあり、その大きさはデバイス動作の雰囲気に依存する。これまでのIL-PRDの性能評価では、MLモデルのトレーニングとテストに用いるデータセットはどちらも、非理想性を含まない信号をIL-PRDに入力して測定していた。本報告では、入力信号の振幅に揺らぎを加えて非理想的入力信号とし、非理想性への耐性とIL-PRD自体の非理想性との関係を調べた。

【実験方法】Fig. 1(a)は本研究で用いたIL-PRDの光学顕微鏡写真である。白色の点線の内部ではPt電極が露出しており、IL/Pt界面が形成される。IL-PRDに使用したILはCu²⁺イオンとしてCu(Tf₂N)₂を0.4 M添加した[C₄mim][Tf₂N]である。素子に電圧を入力するとIL/Pt界面で電気化学反応が起こり、電流が出力される。IL-PRDに対し、各タイムステップ(TS)に“0”と“1”の2値データがランダムに配列したデジタル信号の時系列 u を三角波電圧パルスとして入力し、IL-PRDから出力された電流のデータセットを仮想ノード法で高次元化してMLを行った(ノード数50)。電圧パルスのパルス幅は500 msとした。信号“0”は負電圧、信号“1”は正電圧と定義し、パルス波高(PH)に揺らぎが無い理想的信号 u_1 (真空中ではPH=±3.0 V、大気中ではPH=±2.7 V)、または、そのPHにランダムに±0.1 V、±0.2 Vの揺らぎ ΔPH を加えた非理想的信号 u_2 をIL-PRDへの入力信号とした。Fig. 1(b)にPH=±3.0 Vの場合の u_1 と u_2 の一部を例示した。IL-PRDの動作電流の揺らぎが大きい大気中と、揺らぎが抑制される真空中とで u_1 と u_2 に対する出力電流を測定し、短期記憶(STM)タスクの記憶容量(MC)を比べた。

【結果と考察】Fig. 2は真空中でIL-PRDに u_1 を入力して測定した電流波形である。波形が計測されたTSから3TS前までの u の入力パターンに応じて16色(クラス)に色分けした。例えば“0001”は負、負、負、正の順に電圧を印加した際の正電圧印加時の電流波形である。 u_1 または u_2 をIL-PRDに大気中で入力して測定したデータセットをA1, A2、同様に真空中で入力して測定したデータセットをV1, V2とする。Fig. 2はV1に対応する。さらに、V1のクラスごとに波形を平均化して仮想的に電流値の揺らぎが無い電流波形としたデータセットをM1とする。まず、トレーニングにA1, V1, M1を用いた3種類のSTMタスクのモデルを作成した。それぞれのモデルをP(A)、Q(V)およびR(M)とする。電流値の揺らぎの大きさはA1>V1>M1である。テストデータとして、P(A)、Q(V)、R(M)にそれぞれA1, V1, V1を入力(再代入ではなく、異なるTSのデータセット)した場合と、非理想的な u_2 から測定されたA2, V2, V2を入力した場合とでMCを評価した。その結果をTable 1にまとめた。どちらの場合においても、モデルQ(V)のMCはP(A)やR(M)のMCよりも大きかった。また、P(A)では入力信号に非理想性が加わった場合にMCが著しく低下した。この結果は、PRDのデバイス動作にある一定範囲の非理想性が含まれることが、PRCのMLモデルの入力信号の非理想性に対する耐性の向上に寄与し得ることを示している。

【参考文献】[1]松尾 他、第84回応用物理学会秋季学術講演会(講演番号22a-A302-1)、[2]米澤 他、第83回応用物理学会秋季学術講演会(講演番号23p-M206-7)

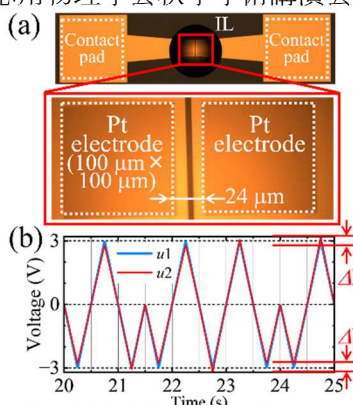


Fig. 1 (a) Microscopy image of IL-PRD and (b) example of input voltage signals u_1 and u_2 .

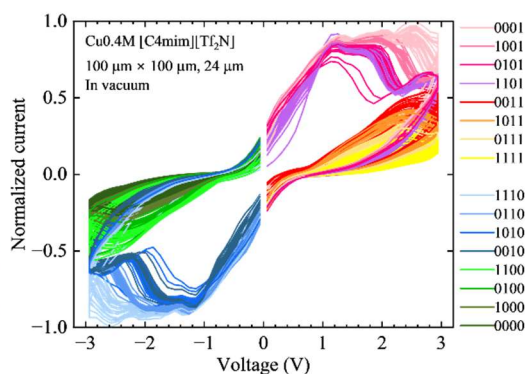


Fig. 2 Color-coded current-voltage curves measured in vacuum by applying the input signal u_1 to IL-PRD.

Table 1 MC values in three models. Data sets A1 and V1 correspond to ideal u_1 , while A2 and V2 correspond to non-ideal u_2 . Data set M1 was calculated from V1.

Model	MC of STM task (training/test data)	
P (A)	1.95	1.45
	(A1/A1)	(A1/A2)
Q (V)	2.37	2.04
	(V1/V1)	(V1/V2)
R (M)	1.96	1.81
	(M1/V1)	(M1/V2)

スピン波のカオス的干渉のその場制御を用いた高精度カオス時系列予測

Precise-Prediction of Chaotic Time-series Data,

Achieved with an *in situ* Manipulation of Chaotic Interfered Spin Waves

NIMS¹, JFCC² ◯並木 航¹, 西岡 大貴¹, 野村 優貴², 山本 和生², 寺部 一弥¹, 土屋 敬志¹

NIMS¹, JFCC², ◯Wataru Namiki¹, Daiki Nishioka¹, Yuki Nomura², Kazuo Yamamoto²,

Kazuya Terabe¹, and Takashi Tsuchiya¹

E-mail: TSUCHIYA.Takashi@nims.go.jp

物理リザーバーコンピューティングは、学習コストが小さく高速処理が可能なりザーバーコンピューティング(RC)を高次元空間への非線形写像能力をもつ物理デバイスで行う人工ニューラルネットワークである。RCに有望な物理デバイスのなかでも、強磁性体中で干渉したスピン波を多端子で検出することで、優れた非線形性と高次元性、短期記憶性を得られることが明らかになった。[1-4]本研究では、固体電解質を用いた強磁性体の酸化・還元反応[5]によりスピン波特性をその場制御し、スピン波干渉の非線形性の制御とリザーバーの高次元性の向上を図った。[6]

Figure A に作製した物理リザーバーの模式図を示す。Y₃Fe₅O₁₂(YIG)単結晶上の4つの励起アンテナと検出アンテナにより、YIG中で非線形干渉したスピン波が多検出される。YIG上の固体電解質NafionとPt電極は、電圧印加によるYIGへのプロトン(H⁺)の挿入脱離を可能とする。このとき、YIGのFeイオンに電子が注入され、Fig. Bに示すようにスピン波の振幅や周波数などの伝搬特性が大きく変化した。各電圧状態において実現される異なるスピン波のカオス的干渉から成るリザーバー状態を用いて、Mackey-Glass 方程式で記述されるカオス時系列予測タスクを実施した(Fig. C)。Figure Dに示すように従来の物理リザーバーと比較して極めて高い性能を得ただけでなく、時系列予測のためのシミュレーションモデルの性能に匹敵する性能を得ることに成功した。当日はYIGへのプロトン挿入の影響や高い性能に至ったカオス的スピン波干渉の複雑性についても議論する。

本研究は防衛装備庁安全保障技術研究推進制度「JPJ004596」、JST さきがけ「JPMJPR23H4」、JSPS 科研費「JP22H04625」および「JP19H05814」(新学術研究領域“蓄電固体界面科学”)の助成を受けて遂行された。

[1] Nakane et al., *IEEE Access* **6**, 4462 (2018). [2] Namiki et al., *Adv. Intell. Syst.* **5**, 2300228 (2023).

[3] Namiki et al., *Mat. Today Phys.* **45**, 101465 (2024). [4] Namiki et al., *Neuromor. Comp. Eng.* accepted.

[5] Namiki et al., *ACS Nano* **14**, 16065 (2020). [6] Namiki et al., *Adv. Sci.* in revision.

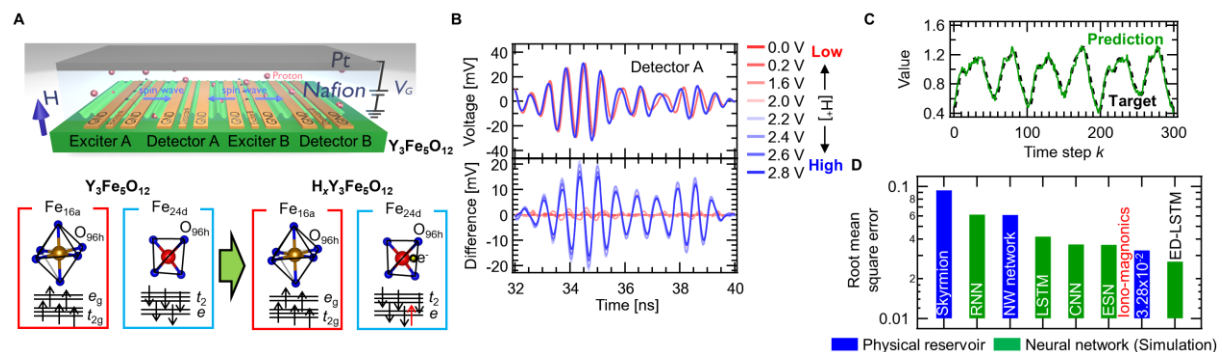


Figure (A) A schematic illustration of the physical device using a Y₃Fe₅O₁₂ and a Nafion electrolyte and spin configuration modulation in Y₃Fe₅O₁₂ due to an electron doping induced by proton insertion. (B) spin wave variation at various voltage applications. (C) A result of predicting a chaotic time-series data deriving from the Mackey-Glass equation. (D) Benchmark comparison of 10 step ahead prediction of the chaotic time-series data. Blue and Green represent physical reservoirs and simulated neural networks, respectively.

スピン波干渉リザーバーコンピューティングによる 高精度カオス時系列予測

High-Precision Prediction of Chaotic Time Series Achieved by
Reservoir Computing Utilizing Interfered Spin Wave

NIMS¹, 東理大² ○日笠 壮太^{1,2}, 並木 航¹, 西岡 大貴¹,
樋口 透², 寺部 一弥¹, 土屋 敬志^{1,2}

NIMS¹, Tokyo Univ. of Sci.², °Sota Hikasa^{1,2}, Wataru Namiki¹, Daiki Nishioka^{1,2}

Tohru Higuchi², Kazuya Terabe¹ and Takashi Tsuchiya^{1,2}

E-mail: TSUCHIYA.Takashi@nims.go.jp

リザーバーコンピューティング(RC)は低計算コスト、高速計算という特徴を持つ AI 学習方法である。特に物理現象でリザーバーを置き換えたものは物理 RC と呼ばれ、様々な材料・デバイスで検討が進んでいる。近年、非線形干渉したスピンを多端子検出することで高性能な物理 RC を実現可能であることが中根らにより理論的に予想され^[1]、並木らにより実験的に実証された^[2]。本研究では、この手法に注目し Mackey-Glass 方程式(MG 方程式)により生成されたカオス時系列データの時系列予測を行った。

本研究では $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 単結晶(YIG)の表面に作成した素子(Fig.(a))を用いて、上記で述べた MG 方程式によるカオス時系列予測を行った。Fig.(a)に示した素子において、Exciter A,B を励起端子とし、残りの 8 端子を検出端子とした。これらを用いて仮想的に 2 入力 8 検出の状態を実現させ、予測を行った。外部磁場 180 mT、パルス間隔 10 ns での予測波形と目標波形の比較を Fig.(b)に示す。予測波形は目標波形とよく一致しており、このタスクにおいて非線形干渉したスピン波による物理リザーバーは既報のものよりも良い性能であることが確認された(Fig.(c))。2 端子から 8 端子への検出端子数の増加に対して予測誤差が顕著に低下しており、高次元性強化による高性能化が示唆される。本研究は防衛装備庁安全保障技術研究推進制度「JPJ004596」の助成を受けて遂行された。

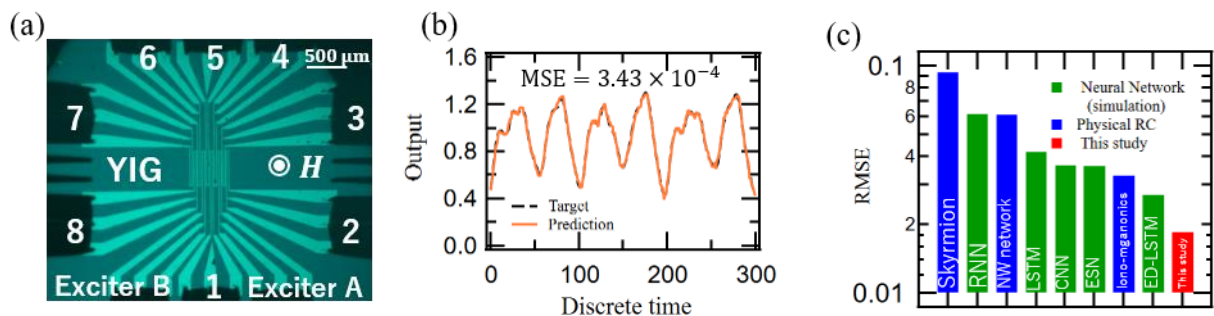


Fig. (a) multi-detection device based on $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (YIG) single crystal (H : the external magnetic field)
(b) Comparisons of target and output waveforms when external magnetic field is 180 mT and interval of the pulse is 10 ns (c) The benchmark of the prediction of Mackey-Glass equation

[参考文献] [1] Nakane et al., *IEEE Access* 6, 4462 (2018). [2] Namiki et al., *Adv. Intell. Syst.* 5, 2300228 (2023)

グラフェン/イオンゲル界面の電気二重層効果を利用する 超高速動作イオンゲーティングリザーバーの開発

Development of an ultra-fast operating ion-gating reservoir based on the electrical double layer effect at the graphene/ion-gel interface

NIMS¹, 東理大² °西岡 大貴¹, 北野 比菜^{1,2}, 並木 航¹, 寺部 一弥¹, 土屋 敬志¹

NIMS¹, Tokyo Univ. Sci.², °Daiki Nishioka¹, Hina Kitano^{1,2}, Wataru Namiki¹, Kazuya Terabe¹,
Takashi Tsuchiya¹

E-mail: TSUCHIYA.Takashi@nims.go.jp

物理系に内在する非線形挙動を情報処理に利用する物理リザーバーコンピューティング(PRC)は、その効率性の高さから次世代エッジ AI デバイスへの応用が期待されている。特に、イオンゲーティングによる材料系への高密度キャリア注入に基づく物性制御を計算資源として利用するイオンゲーティングリザーバー(IGR)は、物性制御と非線形情報処理を結びつける包括的な枠組みであり、これまでに広範な材料系における PRC が実証されている[1-4]。一方、情報担体をイオンが担う IGR は電子デバイスと比べて動作速度が遅い。これは、血糖値等の比較的低速な時系列を処理するうえでは有用な特徴であるが[3,4]、高速な時系列情報の処理に際しては実用上の課題であった。そこで、本研究では高イオン伝導度($\sim 8 \text{ mS/cm}$)のイオンゲル(EMI-TFSI)と CVD 法で作製した単層グラフェンを利用する電気二重層トランジスタ(EDLT)を作製し(図 1(a))、高速動作可能な IGR を開発した。図 1(b)に示すように、作製した素子はグラフェンの特徴的な電子構造を反映した両極性型の振舞いを示し、p 型領域における緩和時間は図 1(c)に示すように 260 ns であった。これは、従来型 EDLT と比べて遥かに高速であることに加え電子デバイスにも匹敵する速度である。本デバイスのドレイン電流応答から抽出したリザーバー状態は、両極性挙動を反映した良好な非線形性を示すとともに、PRC における各種ベンチマークタスクにおいて優れた性能を達成した。特に、パルス周期 5 μs で実行した非線形波形変換タスクでは、図 1(d)に示すように入力三角波の矩形波および二倍波変換に対して、それぞれ精度 99.4%および 99.9%を達成した。二倍波への変換タスクは特に難易度が高いとされているが[5]、本デバイスはグラフェンの両極性挙動を反映した特徴的な写像関数をシステムに内包するため、極めて高い精度を達成した。当日は本デバイスの動作特性や各種性能評価の結果について報告する。本研究は JST さきがけ(JPMJPR23H4)および JSPS 科研費(24KJ0229)の支援を受けて遂行されました。

【参考文献】 [1] D. Nishioka et al., *Sci. Adv.* **8**, eade1156 (2022). [2] T. Wada et al., *Adv. Intell. Syst.* **5**, 200123 (2023). [3] W. Namiki et al., *Nano Lett.* **24**, 4383 (2024). [4] D. Nishioka et al., *Sci. Adv.* **10**, eadk6438 (2024). [5] J. Hochstetter et al. *Nat. Commun.* **12**, 4008 (2021).

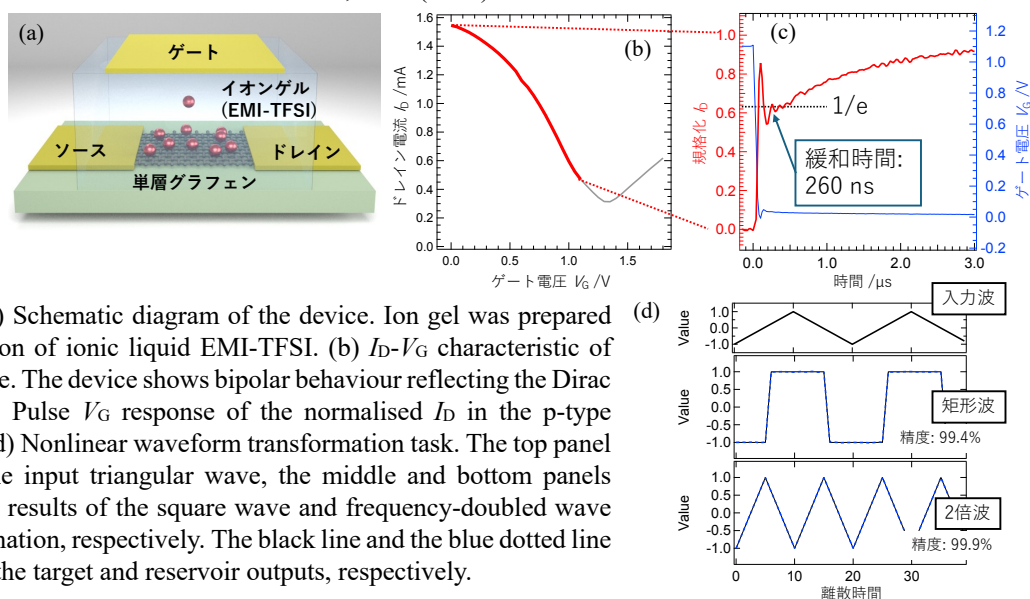


Fig. 1 (a) Schematic diagram of the device. Ion gel was prepared by gelation of ionic liquid EMI-TFSI. (b) I_D - V_G characteristic of the device. The device shows bipolar behaviour reflecting the Dirac cone. (c) Pulse V_G response of the normalised I_D in the p-type region. (d) Nonlinear waveform transformation task. The top panel shows the input triangular wave, the middle and bottom panels show the results of the square wave and frequency-doubled wave transformation, respectively. The black line and the blue dotted line indicate the target and reservoir outputs, respectively.

グラフェンチャネルを用いた固体電気二重層トランジスタによる 物理リザーバーコンピューティング

Physical Reservoir Computing by All-solid-state Electric Double Layer Transistor with Graphene Channel

物質・材料研究機構¹, 東理大² ◯(M2) 北野 比菜^{1,2}, 西岡 大貴¹, 並木 航¹,
寺部 一弥¹, 土屋 敬志¹

NIMS¹, Tokyo Univ. Sci.² ◯(M2) Hina Kitano^{1,2}, Daiki Nishioka¹, Wataru Namiki¹,

Kazuya Terabe¹, Takashi Tsuchiya^{1*},

E-mail: TSUCHIYA.Takashi@nims.go.jp

AI 技術の普及に伴い、クラウドへの情報送信を必要とせず、その場で学習を行うことができるエッジ AI デバイスへの需要が高まっている。物理リザーバーコンピューティング (PRC) は物理系の非線形応答を利用して学習を行う高効率な機械学習であり、デバイスサイズの微細化と高性能学習への可能性があるため、新たなエッジ AI デバイスへの応用に向けた研究が行われている。本研究では、微細化と高性能を両立し得る電気二重層トランジスタ (EDLT) に着目した。

この研究では、チャネル半導体として化学気相成長法で成膜した単層グラフェンを用いた。そして、パルスレーザー堆積法を用いて Li⁺伝導性固体電解質 (アモルファス Li-Nb-O) やゲート電極 (LiCoO₂) などを成膜し、EDLT を作製した (Fig. (a))。ゲート電極に電圧 V_G を印加すると電解質内部で Li⁺輸送が起こることでグラフェン/電解質界面の EDL が変化する。これによりグラフェンの電子キャリア密度が変化してチャネルを流れるドレイン電流 I_D を制御する。電気特性評価およびベンチマークタスクによるトランジスタの PRC 性能評価を行った。ゲート電圧 V_G を -1.5V から +1.5V の範囲で測定した I_D - V_G 特性を見ると、両極伝導特性が明瞭に観察された (Fig. (b))。この EDLT を非線形性と短期記憶を必要とする時系列データ予測タスク (NARMA2) を用いて PRC 性能評価を行った。このタスクでは PRC の非線形変換出力 (予測波形) とターゲットとの正規化平均二乗誤差 (NMSE) の値で評価され、NMSE の値が低いほど高性能を表す。EDLT の予測波形は目標波形を高精度で再現しており (Fig. (c))、NMSE は 0.015 であった。これは、高性能ダイヤモンド EDLT の性能 (NMSE:0.020)¹ と比較しても 40% も低下した。グラフェンの両極電子輸送特性に起因した特殊な I_D - V_G 特性 (非線形性) による非線形変換出力能力が、この高い性能に起因していると考えられる。本研究は JST さきがけ (JPMJPR23H4) の支援を受けて遂行された。

【参考文献】 [1] D. Nishioka et al., Sci. Adv. **8** eade1156 (2022).

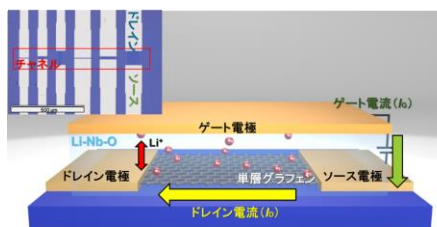


Fig. (a) Schematic image of an ion-gating reservoir

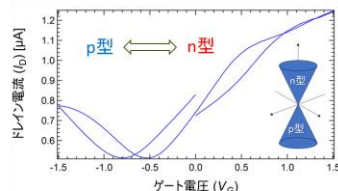


Fig. (b) The I_D - V_G characteristics

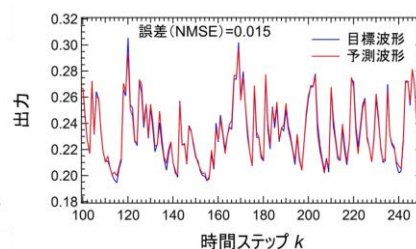


Fig. (c) The target and prediction waveforms for a second-order nonlinear equation task

グラフェン／ダイヤモンド接合型リザーバーを用いた 手書き数字認識

Recognition of hand-written digits using graphene/diamond reservoirs

早大情シス 岩根 東輝, [○]植田 研二

Waseda Univ., Haruki Iwane, [○]Kenji Ueda

E-mail: k-ueda@waseda.jp

【序】 近年我々は、グラフェン／ダイヤモンド接合が、光伝導度がパルス光照射により複雑に変化し保持される“光メモリスタ特性”を有する事を見出した^[1]。グラフェン／ダイヤモンド積層構造の作製条件を制御する事により接合の光伝導度緩和時間（記憶時間）は変化するが、光記憶時間が短い接合素子を用いる事でリザーバー計算が行え、簡単な画像（数字；0-9）認識が行える事も報告した^[2,3]。20 ビット（ 5×4 ）の二値パターンで表現された簡単な数字イメージは90%以上の精度で認識されたが、手書き数字（MNIST-784（ 28×28 ）ビット）の縮約イメージ（64 ビット（ 8×8 ）の二値パターン）の認識率は80%弱であった。手書き数字の認識精度が低い原因について我々は、手書き数字を縮約し過ぎて（ $28 \times 28 \rightarrow 8 \times 8$ ）特徴量が失われ過ぎた為と解釈した。そこで本研究では手書き数字の縮約を極力抑えてリザーバー計算を行う事で認識精度を上げる試みを行った。

【実験】 マイクロ波プラズマ CVD 法により作製した垂直配向グラフェン(VG)／ダイヤモンド積層構造に微細加工を行い、VG／ダイヤ接合（光メモリスタ）を作製した（接合面積 $40 \sim 120 \mu\text{m}$ ）。記憶時間が1秒程度のVG／ダイヤ光メモリスタを用いて手書き数字の高精度認識を試みた。

【結果】 VG／ダイヤ光メモリスタの光伝導度はパルス光に対して敏感に応答し変化した。光オフ後の伝導度の減衰挙動から光伝導度緩和時間は1.2秒と見積もられた。手書き数字イメージ（ 28×28 パターン）の前処理として、情報を殆ど含まないエッジ部を切り取り576（ 24×24 ）ビットデータにした後、1行24ビットのデータを8ビット毎の3個のデータに分割し、72行分の8ビット二値パターンに再構成した（ $24 \times 24 \rightarrow 8 \times 72$ ）（Fig. 1, Left）。なお、光伝導度変化量の大きさを考慮して8ビット毎のデータに再構成している。その後、各行毎（8ビット）の二値化データをパルス光オン（ $\Leftrightarrow 1$ ）、オフ（ $\Leftrightarrow 0$ ）に変換後光メモリスタに照射し、光伝導度の最終値を記録した。この操作を各行毎に繰り返す事で72個の伝導度データ（ $I_1 \sim I_{72}$ ）が得られこれらを学習済みの2層ニューラルネットに入力する事で数字識別が行われる形となる。50パターンの画像データを用意し、半分程度を学習に残りを用いて数字認識を試みたが100%の識字率を得た。数字イメージの縮約を行わずに認識させる事で精度が向上しそうであるが、未だ50パターンと少ないサンプル数でしか認識ができていないので、サンプル数を増加させて本手法の有効性を確認していく。また画像の縮約度と測定時間はトレードオフの関係になるが、どの程度の画像縮約がより高精度かつ高効率となるかも確認していく。

Ref.: [1] Y. Mizuno et al., Carbon. 182 (2021) 669., [2] Y. Ito et al., APEX, 16 (2023) 071004. [3] 2023

年第84回
応用物理学
会秋季学術
講演会予
稿, 岩根ら,
22p-A302-
13.

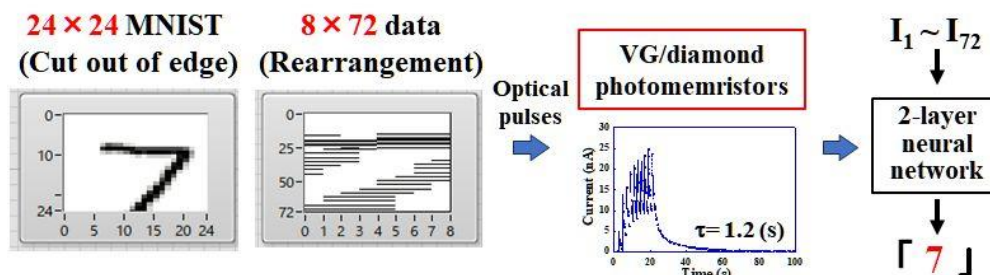


Fig. 1: Direct recognition of digits using VG/diamond photomemristors.

FS フォーカストセッション「AIエレクトロニクス」 | 一般セッション(口頭講演): FS.1 フォーカストセッション「AIエレクトロニクス」

[17a-A33-1~11] FS.1 フォーカストセッション「AIエレクトロニクス」

PR

secret place

[17a-A33-1]

高忠実度なプログラマブル光ユニタリ変換回路と長距離空間多重光伝送における信号処理アシストへの応用

○中島 光雅¹、芝原 光樹²、池田 幸平³、川合 暁²、小林 孝行²、宮本 裕²、橋本 俊和¹ (1.NTT先デ研、2.NTT未来研、3.NTT物性研)

[17a-A33-2]

サブキャリア信号変調時の相互変調歪の光エクストリーム学習器への適用

○田中 英明¹、管 貴志¹、高橋 英憲¹ (1.KDDI総合研究所)

[17a-A33-3]

リードアウト層を集積化した全光リザバー計算回路によるリアルタイム予測演算の実証

○(M2)高林 奎吾¹、丸山 武男¹、新山 友暁¹、砂田 哲¹ (1.金沢大学)

[17a-A33-4]

ナノ秒現象を可視化する高速イメージングに向けた光ハードウェア及び再構成アルゴリズムの開発

○(M1)本岡 眞¹、山口 智也、新山 友暁¹、砂田 哲¹ (1.金沢大)

[17a-A33-5]

超高次元コンピューティングに基づく光センシング

○(M1)Hong Jiseon¹、北川 慧、新山 友暁¹、砂田 哲¹ (1.金沢大)

[17a-A33-6]

リザーバーコンピューティングによるノイズが付加されたレーザダイナミクスの複製

○加瀬 圭佑¹、川上 敦也¹、内田 淳史¹ (1.埼玉大)

[17a-A33-7]

リザバー計算の枠組みを利用した表面筋電信号解析と動作推論

○星加 悠介¹、葛西 誠也¹ (1.北大量集センター)

[17a-A33-8]

粘菌型自律ロボットの行動発達に向けた身体感覚に基づく歩行移動距離推定と精度向上

○(M2)松田 一希¹、葛西 誠也¹ (1.北大量集センター)

[17a-A33-9]

圧電MEMSリザバー素子における結合重みと計算性能との関係

○吉村 武¹、芳賀 大樹¹、藤村 紀文¹、神田 健介²、神野 伊策³ (1.大阪公立大工、2.兵庫県大工、3.神戸大工)

[17a-A33-10]

圧電共振リザバーにおける非線形性と学習性能の関係

○庄野 武洋¹、藤村 紀文¹、吉村 武¹ (1.阪公大工)

[17a-A33-11]

圧電振動子電流センサを用いた物理リザーバーコンピューティング

○(M1)西村 恵¹、藤村 紀文¹、吉村 武¹ (1.大阪公立大院工)

高忠実度なプログラマブル光ユニタリ変換回路と 長距離空間多重光伝送における信号処理アシストへの応用

High Fidelity Programmable Photonic Unitary Processor and Its Application to Signal Processing in Long-Haul Space-Division-Multiplexed Transmission

NTT 先デ研¹, NTT 未来研², NTT 物性研³, [○]中島光雅¹, 芝原光樹², 池田幸平³, 川合 暁², 小林孝行², 宮本裕², 橋本俊和¹

NTT DTL¹, NTT NIL², NTT BRL³, [○]Mitsumasa Nakajima¹, Kohki Shibahara², Kohei Ikeda³, Akira Kawai², Takayuki Kobayashi², Yutaka Miyamoto², and Toshikazu Hashimoto¹

E-mail: mitsumasa.nakajima@ntt.com

【背景】プログラマブルな光回路を用いたユニタリ変換回路は、光学的に線形行列計算が可能であり、計算機や光情報処理応用への期待が高まっている¹。特に、現在の光通信においては、デジタル信号処理(DSP)による信号補償が広く用いられているが、空間多重(SDM)光通信などの次世代伝送においては、大規模化に伴う困難性が指摘されており²、光計算による処理のアシストが着目されている^{3,4}。本稿では、石英光導波路にてユニタリ変換回路を作製し⁵、3モードファイバを用いた1300km級SDM光通信に適用し、DSP処理負荷の低減について検討したので報告する⁶。

【実験・結果】Fig. 1(a)にユニタリ変換回路のSDM光伝送路への適用方式について示す。従来文献4,5とは異なり、送受信機の前後段ではなく、各中継ノード内にユニタリ変換回路を配置する。各ノードで多重化された空間モード間の結合を制御・最適化することで、DSP上でのMIMO処理負荷の主要因の1つであるモード間遅延差を最小化する。原理実証のために、Fig.1(a)挿入図に示すような、8×8 Clements型ユニタリ変換回路を作製した。SDM光通信では、波長多重(WDM)による伝送も行われるため、光ユニタリ変換回路には広い通信波長域での高い忠実度（所望の行列と実装された行列の R^2 値）が要求される。そこで、波長依存性の要因となる光路差を含まない設計を行い、材料自体の波長依存の少ない石英系導波路に試作を行った。また、製造誤差に伴う忠実度の低下を補償するために、機械学習を用いた校正手法を適用し、中心波長で0.99、通信バンドC帯(1530-1570 nm)で>0.96の忠実度を得た。挿入損失は2.8dBであった。本回路を、51.2kmの3モードファイバからなる周回光伝送系に組み込んだ。周回数を増すごとに疑似的に伝送距離を延ばすことが可能であり、本実験では最大1331kmの伝送実験を行った。Fig.1(b)にユニタリ変換回路を導入する場合と、ユニタリ変換回路を最適化した場合のDSPにおける遅延等化器長 τ を示す。 τ はモード間遅延差を反映する値であり、DSP負荷は $O(\tau)$ で増加するため、低減することが望ましい。低減効果は、定性的には伝送距離 L が伸びるほどに \sqrt{L} に比例して改善され、最大で約60%の低減効果を得た。

【謝辞】本研究成果の一部は、国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT）の委託研究（JPJ012368C01001）により得られたものです。

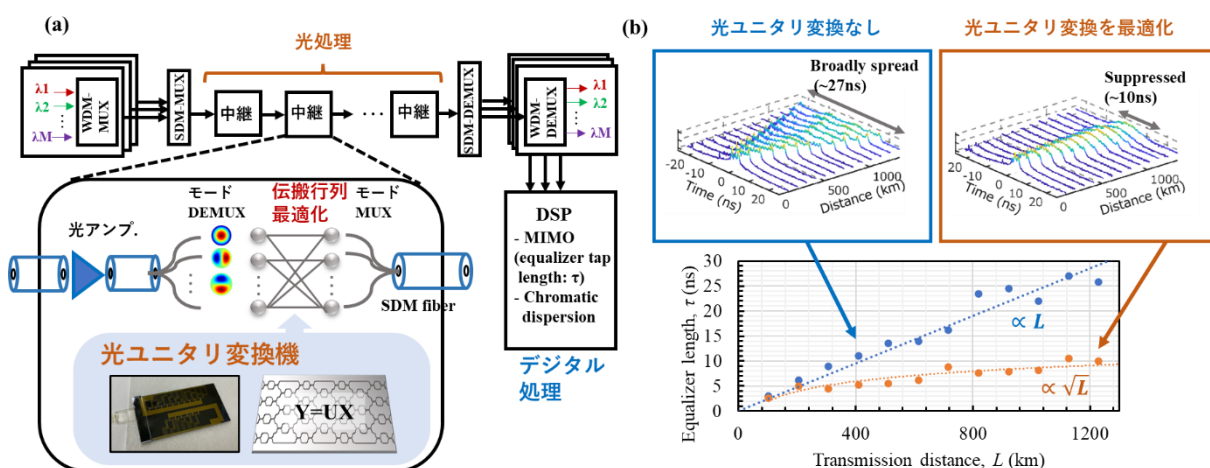


Fig.1 (a) Schematic of mode optimization for SDM transmission using photonic unitary processor. (b) Required equalizer length as a function of transmission length.

- [1] N. C. Harris *et al.*, Optica 5, 1623–1631 (2018)., [2] P. Sillard *et al.*, Proc. IEEE 110, 1804–1820 (2022)., [3] C. Huang *et al.*, Nature Electronics 4, 837–844 (2021)., [4] R. Tanomura *et al.*, JLT 41, 3791 – 3796 (2023). [5] K. Ikeda *et al.*, CLEO, JTh2A.87 (2024)., [6] K. Shibahara *et al.*, OECC 194 (2024).

サブキャリア信号変調時の相互変調歪の光エクストリーム学習器への適用

Implementation of Photonic Extreme Learning Machine

with Intermodulation Distortion Caused by Subcarrier Modulation

KDDI 総合研究所 〇田中英明, 管貴志, 高橋英憲

KDDI Research, Inc. 〇Hideaki Tanaka, Takashi Kan, Hidenori Takahashi

E-mail: hk-tanaka@kddi.com

【はじめに】

光ニューラルネットワーク（PNN）は消費電力、処理速度の点で期待されているが、大規模な入力データが必要となる画像処理への適用は、簡単な光学系での実現が難しい状況である^[1-4]。本稿では周波数領域で入力データ次元を増やす新たな PNN の提案と実験的検証について報告する。

【提案・検証】

実験した PNN は、Fig. 1 のようにレーザ光（ $\lambda=1562\text{nm}$ ）を、任意波形発生器（AWG）で発生させた重み付けしたサブキャリア信号にバイアス電圧を加えて駆動した LN マッハツェンダー変調器（ $V_{\pi}=4.9\text{V}$ ）で変調し、その変調光をフォトダイオード（PD）で光電変換した後、RF スペアナでスペクトル観測をする構成とした。本 PNN の有効性を検証するために、MNIST データセット（ピクセル： 28×28 、階調：256）を用いることとし、データを 784×1 に平坦化した後、 200kHz 等間隔で 43MHz から 200MHz の間に範囲に発生させたサブキャリアの振幅を階調情報に応じて 5%~100%の間で変えて周波数領域に付加した。変調器の相互変調歪（IMD）により生じたサブキャリアのスペクトル強度（8 回平均した電圧値）をエクストリーム学習器（ELM）^[5]の隠れ層出力と見なして、リードアウト

層（全結合層、出力:10）に入力することとした。まず、MNIST データの一部（学習：10,000、検証：2,000）を用い、AWG 出力の最大振幅電圧 V_{p-p} を 5V としてバイアス電圧 V_b 依存性を調べたところ、ヌル電圧で分類精度が最も高くなることを確認した。次に分類精度のリードアウト層に入力する IMD 成分数依存性を評価した（Table 1）。4801 点以上で精度飽和が観測された。最後に全 MNIST データを使用して検証した（学習：60,000、検証：10,000）。AWG 出力のスペクトル直接観測時と、変調器出力観測時の精度は、それぞれ 93.36%及び 97.29%（Fig. 2）であった。著者らの調べた限りでは前処理なしで単層リザーバーコンピューティング及び ELM を適用し、実験的に得られている最高精度はそれぞれ 97.15% [3]及び 93% [4] であり、提案した PNN は簡単な光学系を用いて周波数領域で入力次元を増やすことができ、精度の点でも高いポテンシャルを有していると考えられる。

【参考文献】

[1] T. Zhou et al., J. Lightwave Tech., vol. 40, p. 1308(2022).
[2] X. Xu et al., Nature, vol. 589, p. 44 (2021).
[3] P. Antonik., IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. Vol. 26, 7700812(2020).
[4] D. Silva et al., J. Eur. Opt. Society-Rapid Publ., vol. 1, 19(2023).
[5] G.-B. Huang et al., Neurocomputing, vol. 70, p. 489(2006).

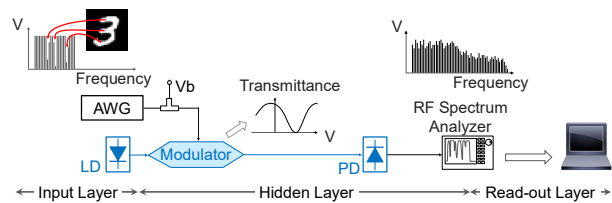


Fig. 1 Experimental setup for proposed PNN by using IMD.

Number of IMD components	801	1601	2401	3201	4801	6401
Frequency range (MHz)	40 - 200	40 - 360	40 - 520	40 - 680	40 - 1000	40 - 1320
Accuracy (%)	92.95	94.10	94.35	94.45	94.50	94.50

Table 1 Accuracy dependency on number of IMD components.

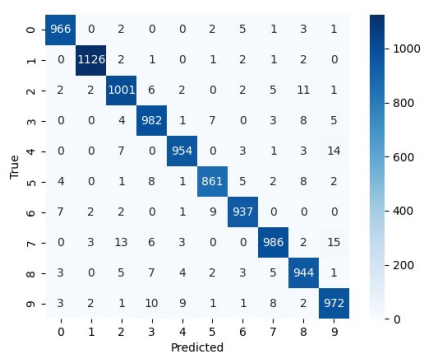


Fig. 2 Confusion matrix.

(V_b : null point, V_{p-p} : 5 V, IMD components: 4801)

リードアウト層を集積化した全光リザーバー計算回路による リアルタイム予測演算の実証

Realtime prediction based on all-photonic reservoir circuit integrated with a photonic readout layer

金沢大¹, [○](M2) 高林 奎吾¹, 丸山 武男¹, 新山 友暁¹, 砂田 哲¹

Kanazawa Univ.¹, [○]Keigo Takabayashi¹, Takeo Maruyama¹, Tomoaki Niiyama¹,
Satoshi Sunada¹

E-mail: keigo2014@stu.kanazawa-u.ac.jp

近年の情報技術の急速な発展により、複雑な情報処理に対応するコンピューティングの需要が爆発的に増加している。そのため、低消費電力で情報処理が可能なりザーバーコンピューティング(RC)と高自由度性や信号処理の高速化などの利点をもつ光と組み合わせた光 RC が大きな注目を集めている。しかし、従来の光 RC システムの多くは、読み出し処理をオフラインの電子処理で行っていた[1]。そこで本研究では、光で演算処理を行うことが可能なリードアウト層を有する光リザーバー回路を作製し、それをオンライン学習することで、数十ピコ秒の超低遅延での時系列予測が可能となることを示す。

本提案光リザーバー計算回路は、結合リング共振器からなる光リザーバー層と、光を調整可能な複数の位相シフターと Mach-Zehnder interferometer (MZI)を有するリードアウト層をシリコン光チップ上に集積化しており(図 1(a))、光入力から演算結果の出力までが 27ps の低遅延で実行できる。図 1 に示す評価実験では、任意の波形に位相変調させたレーザ光を光リザーバー回路に入力として送り、リードアウト層では、マルチチャンネル digital analog converter (DAC)を用いて位相シフターと MZI に電圧を印加することで重みづけ処理が行われる。出力光が推論結果として検出され、ターゲットとのロス計算し電圧値を進化戦略を用いて更新していくことで学習を行った。本実験ではカオス時系列を用いた 1 ステップ先の予測が NMSE 0.31 の精度で可能となった。本発表では、様々なタスクに対する性能評価結果や進化戦略以外のオンライン学習手法を適用した結果も報告する。

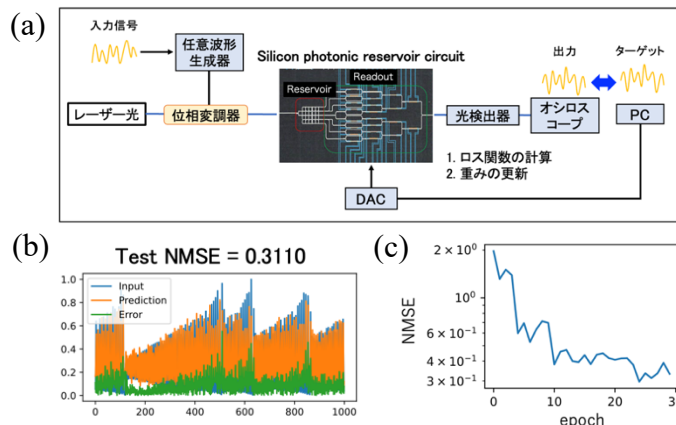


Fig.1 Online learning system using a silicon photonic reservoir chip integrated with a photonic readout layer. (a) Experimental set up. (b) One-step-ahead prediction for the Santa-Fe chaotic time series prediction task (c) Learning curve. NMSE as a function of epochs.

[1] Yamaguchi Tomoya et al., "Time-domain photonic image processor based on speckle projection and reservoir computing," Commun Phys 6, 250 (2023).

ナノ秒現象を可視化する高速イメージングに向けた 光ハードウェア及び再構成アルゴリズムの開発

Development of optical hardware and reconstruction algorithms for high-speed imaging to visualize nanosecond phenomena

金沢大¹, [○](M1)本岡 眞¹, 山口 智也, 新山 友暁¹, 砂田 哲¹

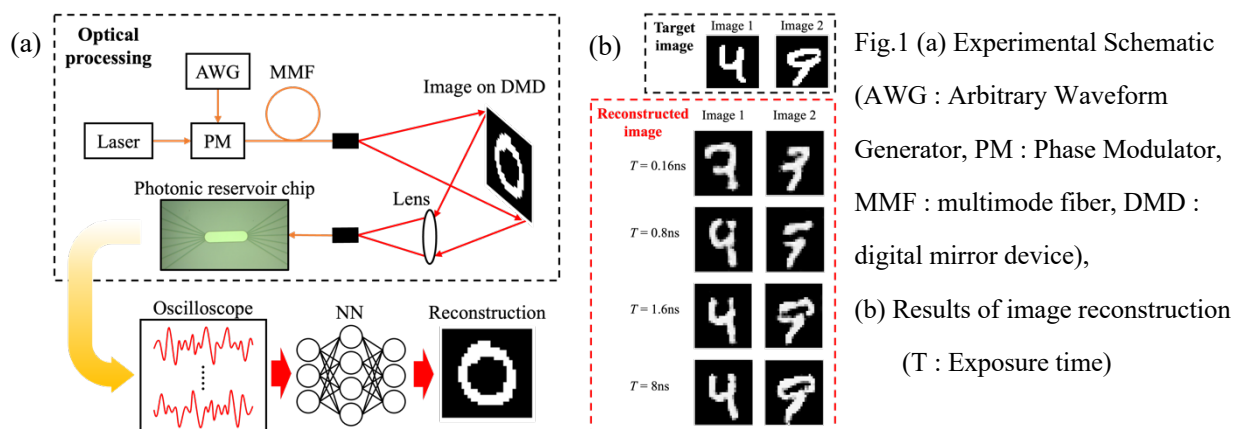
Kanazawa Univ.¹, [○]Shin Motooka¹, Tomoya Yamaguchi, Tomoaki Niiyama¹, Satoshi Sunada¹

E-mail: shin-motooka@stu.kanazawa-u.ac.jp

高速イメージングはあらゆる科学技術の基盤となり得るものであり、例えば、工業分野での高速現象の解析（例えば、プラズマ現象、衝撃に対する材料の変形反応等）から高速な細胞のソーティングなど様々な分野への応用が期待されている。しかし、従来の高速イメージング技術は高価且つ大型な装置から構成され、一過性現象の連続撮影が困難である。

この問題に対処するために、本研究ではたった1つの光検出器でナノ秒に迫る高速現象を観察できるイメージセンサフリーの光イメージングシステムを提案した[1]。この提案システムは、視覚情報を時間情報に変換するための高速ランダムパターン投影[2]に基づいており、ナノ秒スケールで変動する現象のイメージの再構成が可能である。フェムト秒レーザーやストリークカメラを用いた高速イメージング技術とは異なり、長時間の連続撮影も可能である。

本提案システムの概略図を Fig. 1 に示す。レーザー光をマルチモードファイバ（MMF）へ送ることで、光強度が時間的に変化するランダムパターンを生成する。デジタルミラーデバイス（DMD）上に表示したイメージへ投影し、反射光を直接、光リザバーコンピューティングチップへ入力として送り、出力光を応答信号として検出する。その信号を用いて、画像再構成を電子的な処理で行う。本実験では、10 クラスの MNIST 手書き数字を 10,000 枚用いて画像の再構成を行い、画像処理性能を明らかにした。



[1] T.Yamaguchi *et al.*, “Ultrafast single-channel machine vision based on neuro-inspired photonic computing,” *Communication Physics* 6, 250 (2023).

[2] J. Hanawa *et al.*, “Gigahertz-rate random speckle projection for high-speed single-pixel image classification”, *Optics Express* 30, 22911 (2022).

超高次元コンピューティングに基づく光センシング

Optical sensing based on Hyperdimensional Computing

金沢大¹, °(M1)Hong Jiseon¹, 北川 慧, 新山 友暁¹, 砂田 哲¹

Kanazawa Univ.¹, °Hong Jiseon¹, Kei Kitagawa, Tomoaki Niiyama¹, Satoshi Sunada¹

E-mail: jiseonhong@kanazawa-u.ac.jp

Hyperdimensional Computing(HDC)は、リザーバー計算のように入力情報を高次元空間へ射映することで、既存のマシンラーニングに比べて低い計算コストを持ち、高速処理を可能にする。HDCは入力データをバイナリ化して Hyper Vector(HV)という 1,000 以上の超高次元のベクトルに変換し、基本的な算術演算(足し算,乗算)をすることで一つのベクトルに多くの情報を貯めることができる。また、高次元分散表現により、少ないデータ数で学習が可能であり、新しいデータを元のプロトタイプベクトルに部分的に更新する再学習から環境変化した場合でも精度が回復できる。

本研究では、ソフトマテリアル内部にレーザー光を照射することで触覚情報をレーザー散乱パターンという高次元情報に変換し、それを HV として用いる[1](Fig.1(a)). 生成された HV は HDC の原理に基づいて学習して未知の触覚情報を推定できる(Fig.1(b)). また、再学習を用いて少ないデータからプロトタイプベクトルの情報を更新することで精度の回復が可能となることを検証する[Fig.2]. 本研究では、触覚反応を用いた新しいデータ処理方法を考案することで小型装置での活用および省エネルギーの実現が期待できる手法を示す。

Fig.1

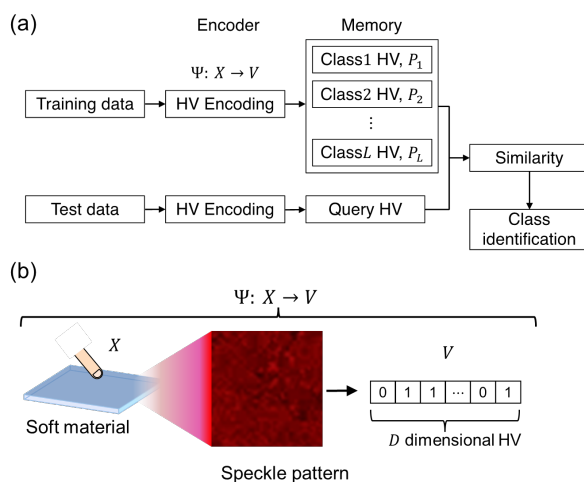


Fig.2

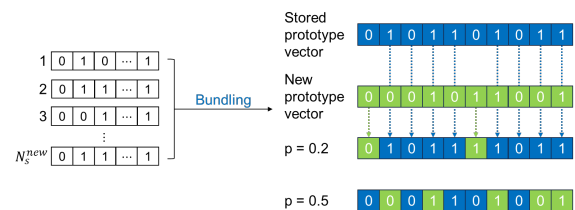


Fig.1 (a) HDC を用いた分類. (b) スペックル現象と HDC を用いた光学的エンコーディング.

Fig.2 再学習におけるプロトタイプベクトルの更新方法.

[1] Kitagawa, Kei, et al. "Optical hyperdimensional soft sensing: speckle-based touch interface and tactile sensor." *Optics Express* 32.3 (2024): 3209-3220.

リザーバーコンピューティングによる ノイズが付加されたレーザダイナミクスの複製

Replication of laser dynamics with noise using reservoir computing

埼玉大[○]加瀬 圭佑, 川上 敦也, 内田 淳史

Saitama Univ., [○]Keisuke Kase, Atsuya Kawakami, Atsushi Uchida

E-mail: k.kase.090@ms.saitama-u.ac.jp, auchida@mail.saitama-u.ac.jp

1. はじめに

再帰的なネットワーク構造を有するリカレントニューラルネットワークを用いた機械学習が盛んに行われている。しかしながら、リカレントニューラルネットワークは学習が困難であるという欠点が存在する。そこで、出力重みのみの学習により機械学習が実現でき、リザーバーコンピューティングは、計算コストの削減が可能である[1]。

リザーバーコンピューティングの研究例の一つとして非線形ダイナミクスの複製が報告されている[2]。非線形ダイナミクスは、カオスの初期値鋭敏性により長期的な時系列予測が困難であることが知られている。そこで、非線形ダイナミクスの複製により、長期的に類似した特徴を持つダイナミクスの再現が可能である。ダイナミクスの再現によりモデルが未知のダイナミクスの複製が期待される。

戻り光を有する半導体レーザのダイナミクスは時間遅延系であり、複素電界からなるダイナミクスが複雑であることが知られている。また、複素電界の取得はコヒーレント検波により可能であり、実験データを用いる場合にはノイズの影響の調査が不可欠である。

そこで本研究では、ノイズが付加された半導体レーザのカオスアトラクタに対して、リザーバーコンピューティングを用いて複製を行うことを目的とする。また、複製したアトラクタに対して定量的な評価を行い、ノイズの影響の調査を行う。

2. 方法と結果

入力である戻り光を有する半導体レーザダイナミクスは、Lang-Kobayashi 方程式から数値計算により算出する[3]。ボックスミュラー法を用いてノイズの付加を行う。

本研究では、リザーバーコンピューティングの1つであるエコーステートネットワークを用いて複製を行った[4]。学習時は、入力信号としてレーザ出力の複素電界の実部虚部とその遅延時間前の信号を用い、複素電界の実部虚部の1点先を出力とするように出力重みの学習を行った。また、出力信号に複素電界の実部虚部の遅延時間前の1点先を付加することによりダイナミクスの生成を行う。

生成したダイナミクスのカオスアトラクタを Fig.1 に示す。アトラクタは、複素電界の実部虚部から算出したレーザの光強度とその遅延時間前の光強度から作成した。複製されたアトラクタ(Fig.1(b))は、ノイズを付加した入力のアトラクタ(Fig.1(a))よりも、ノイズを付加していないアトラクタ(Fig.1(c))に類似している。このことから、リザーバーコンピューティン

グのノイズ低減の効果を確認した。

また、アトラクタの類似度の評価としてカルバックライブラー情報量の算出を行った。カルバックライブラー情報量は、数値が低いほど類似した分布であることを表している。Fig.2 は入力のノイズ強度を変化させた際のカルバックライブラー情報量を示している。黒線が複製したアトラクタとノイズを付加した入力を比較した値であり、青線が複製したアトラクタとノイズを付加していない入力を比較した値である。SNR (信号対雑音比) が 17.7 dB より小さい場合において、ノイズなしの場合の方が値が低くなり、ノイズ低減の効果が表れている。

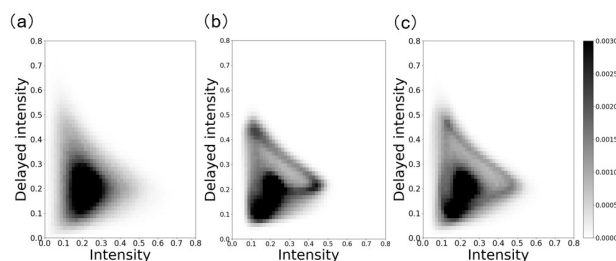


Fig. 1 Chaotic attractors of (a) input signal with noise, (b) replicated output by reservoir computing, and (c) input signal without noise.

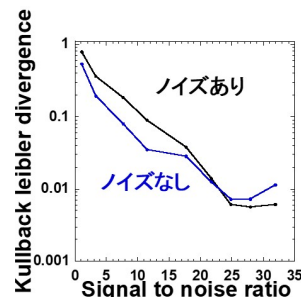


Fig. 2 Kullback Leibler divergence of input and replicated attractors with and without noise.

3. まとめ

本研究では、リザーバーコンピューティングを用いてノイズを付加した半導体レーザダイナミクスのアトラクタの複製を行った。その結果、SNR が小さい場合にリザーバーコンピューティングによるノイズ低減の効果を確認した。

参考文献

- [1] 菅野円隆, 内田淳史, “光リザーバーコンピューティング -原理と実装-”, 共立出版 (2024).
- [2] J. Pathak, et al., Phys. Rev. Lett., **120**, 024102 (2018).
- [3] R. Lang, et al., IEEE J.Quantum Electron., **16**, 347 (1980).
- [4] H. Jaeger, Scholarpedia, **9**, 2330 (2007).

リザーバー計算の枠組みを利用した表面筋電信号解析と動作推論

Analysis on Surface Myoelectric Signal and Motion Inference Utilizing

Reservoir Computing Framework

北大 量集センター ○星加 悠介, 葛西誠也

RCIQE, Hokkaido Univ., ○Y. Hoshika, S. Kasai

E-mail: hoshika.yusuke.q3@elms.hokudai.ac.jp

はじめに：筋肉の収縮時に生じる活動電位筋電信号を利用して操作する筋電義手は、現状では操作性が不十分であり自らの手を代替するレベルに至っていない[1]。操作性の改善には、身体表面から取り出す筋電信号（表面筋電）から意図した運動の情報を正確に読み出す必要があるが、微弱でかつ複雑な時系列波形をリアルタイム解析し情報取得することは容易ではない。近年、深層学習などの機械学習を用いた解析が行われているが[2]、計算量が多いため利用できる電力が限られている義手に実装すること難しい。そこでは我々は表面筋電波形の複雑性をリザーバー計算（RC）の概念をオーバーラップさせた新規の筋電信号解析手法を検討している[3]。本報告では、第一段階としてRCを外部計算機に実装しコンセプトの実験実証を試みた結果について述べる。

実験方法：筋電信号は人の意図動作が複雑なインパルス時系列に変換されたものであることから、意図運動を高次元時空間にマッピングしたものと解釈できる。動作意図を入力、手の動作を出力とみなすと、脳から運動神経系を物理リザーバー層と見做せる。このとき複数箇所検出された表面筋電はリザーバー層出力であり、これらの線型結合が運動を表現しうとの仮説が立つ。そこで、Fig. 1 に示すように、健康者の前腕8箇所に表面電極を取り付け双極誘導によって筋電信号を誘導し、これらの重み付け線形結合によって手の甲に取り付けた3軸加速度センサの出力を表現できるか検証した。

結果：5通りの手の動作に対し表面筋電を取得した。ここでは神経回路の積分機構に倣い双極誘導波形を整流したのち積分したものをリザーバー出力としている。同時に計測した加速度を教師データとしてバッチ学習を行い、筋電波形の線型結合の重み付けを決定した。測定した加速度と推論結果の例を Fig. 2 に示す。両者の相関係数は 0.84 と高い値となった。提案手法によって意図する動作を概ね推論できることが実験的に示された。

[1] A. D. Roche *et al.* Curr. Surg. Rep. **2**, 44 (2014).

[2] R. Rajapriya, K. Rajeswari, S. J. Thiruvengadam, Biocybernetics Biomed. Eng. **41**, 554 (2021).

[3] 吉田, 葛西, 第 83 回応物秋季講演会, 2022 年 9 月, 東北大.

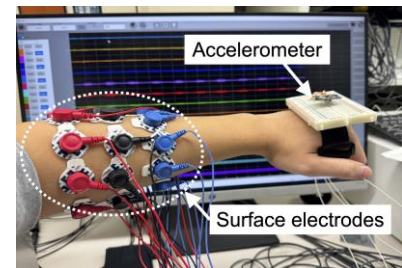


Fig. 1 Experiment setup.

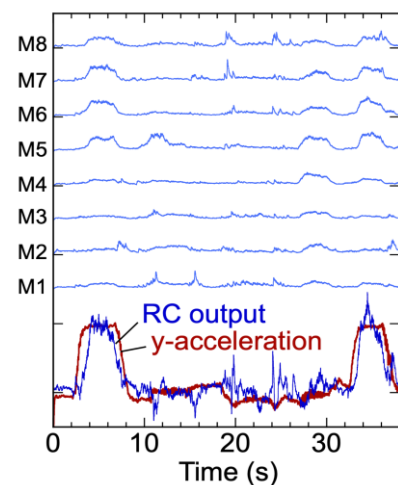


Fig. 2 Measured acceleration (y-axis) and RC output together with measured myoelectric signals.

粘菌型自律ロボットの行動発達に向けた身体感覚に基づく 歩行移動距離推定と精度向上

Accurate Estimation of Traveling Distance Based on Physical Sensations for Behavior Development in Amoeba-inspired Autonomous Walking Robot

北海道大学 量集センター, [○]松田 一希, 葛西 誠也

RCIQE, Hokkaido Univ., [○]K. Matsuda, S. Kasai

E-mail: matsuda.kazuki.m0@elms.hokudai.ac.jp

はじめに:我々は高度な計算能力を持つ生物粘菌に着想を得た最適化問題探索システムを歩行ロボットに応用し、その自律歩行に成功している[1]。次のステップは自律的に行動を洗練させ歩行効率を高める発達能力の獲得である。歩行の発達にはロボット自身が移動量を認識しなければならないが、我々は最小限のセンサを最大限活用し必要な情報を得ることを方向性とし、視覚情報に頼らず身体感覚の1つである加速度の利用を検討している。しかし、歩行時に身体の上下動が生じると加速度センサの計測誤差が増大し移動量を適切に評価できなくなる。そこで、本研究ではリザーバー計算 (RC) を適用し加速度センサを用いた移動量評価の精度向上を試みた。

実験方法:市販の4脚歩行ロボットに3軸加速度センサを搭載し、進行方向 (x 軸方向) の加速度情報を取得する (Fig. 1(a))。ロボットには転倒に至る足の動きを禁止するよう制約を設定し、この制約のもとで可能な足の動きを探索する手法でランダムに歩行させた。外部 PC にリザーバー計算システムを実装し (Fig. 1(b))、加速度センサの出力を1歩毎にサンプリングした時系列データを入力、ロボット歩行を動画撮影し実測により求められた移動距離の時系列を教師データとして出力層の重み付けを学習させた。リザーバー計算による推定移動距離と実測値の誤差の分布を Fig. 2 に示す。加速度の時間二重積分による移動距離評価では 5 cm 程度の移動に対して 1 m 以上の誤差が生じたが、リザーバー計算を用いることで移動距離の推定精度が大幅に改善した。さらに、リザーバー層のノード数の増加にともない推定精度は大幅に向上し、本手法による移動距離推定の有効性が確認された。今後さらなる精度改善を進めるとともに、リザーバー計算系をロボット本体に実装し粘菌型最適化と強化学習を融合した自律歩行の行動発達[2]の実現を目指す。

[1] K. Saito, N. Suefuji, S. Kasai and M. Aono, Proc. IEEE ISMVL2018, pp.127-131 (2018).

[2] 大沼, 斉藤, 葛西, 青野, 第 81 回応物秋講演会 9p-Z28-16 (2020).

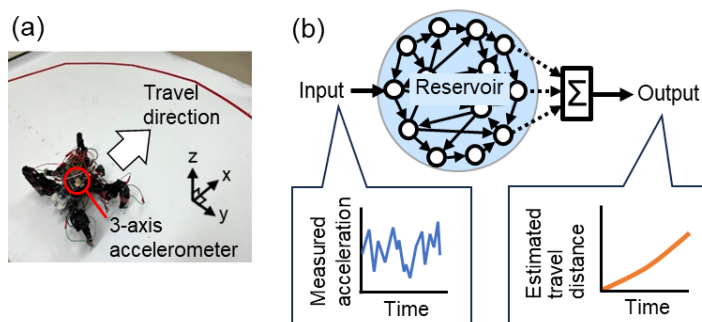


Fig. 1 (a) Experimental setup and (b) Estimation of traveling distance using reservoir computing, RC.

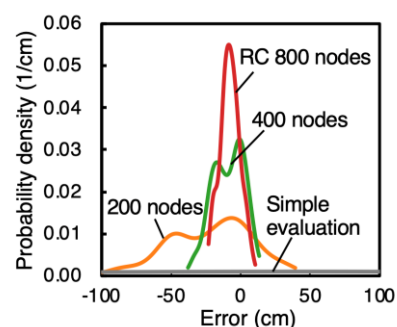


Fig. 2 Accuracy in estimated travel distance using RC.

圧電 MEMS リザーバー素子における結合重みと計算性能との関係

Relationship between coupling weights and computational performance in piezoelectric MEMS reservoir

阪公大工¹, 兵庫県大工², 神戸大工³

○吉村 武¹, 芳賀大樹¹, 藤村紀文¹, 神田健介², 神野伊策³

Osaka Metro. Univ.¹, U. Hyogo², Kobe Univ.³

°T. Yoshimura¹, T. Haga¹, N. Fujimura¹, K. Kanda², I. Kanno³

E-mail: yoshimura@omu.ac.jp

【はじめに】本研究ではセンサの智能化を目的として、圧電 MEMS 共振子をノードに用いたリザーバー素子を作製し、その学習性能評価を行っている[1,2]。これまでに共振子からの過渡応答、CR 回路による信号遅延、電界効果トランジスタ(FET)による共振子の電気的結合等を用いて、2.7 の Parity check capacity (PCC)が得られたことを報告している[3]。今回は、二つの共振子を電気的に結合の重みを変えられるようにアナログ回路部分を改良し、リザーバー層の状態と学習性能との関係を調べた。

【実験および結果】構築したリザーバー素子の等価回路を Fig.1(a)に示す。片持ち梁構造の圧電 MEMS 共振子(写真)を二つ用いており、FET で電気的に結合している。一つ目の共振子(P1)の出力を、増幅・全波整流、CR 回路による遅延を行い、Node A の信号としている。さらに FET の閾値付近に調整するため、加算回路で Node A の信号に V_{add} を加え FET のゲートに入力した。この接続により Node A の信号で FET のチャネル抵抗を変調でき、また二つ目の共振子(P2)に FET を負荷として接続することで、リザーバー素子で必要である過去と現在の入力信号の影響の重なり合いを実現している。Fig.1(b)(c)は、印加した振動の波形(黒)、異なる V_{add} で測定した Node A、B からの出力波形(それぞれ青、赤)、Parity Check タスクでの Capacity 値(C_{PC})を示している。ゲートへの入力信号が閾値付近となる-2~0V の V_{add} において結合重みが大きくなり、Node A の信号が Node B の信号に強く影響を及ぼしている。さらにその領域で C_{PC} の値も上昇しており、最高値では 2.8 となった。講演ではノード間の相関係数等も用いて、リザーバー層の状態と学習性能との関係について詳細に議論する。

【謝辞】本研究は JST CREST (JPMJCR20Q2, JPMJCR20C3)の支援を受けて行われた。

【参考文献】

- [1] T. Yoshimura et al., Jpn. J. Appl. Phys., 62, SM1013 (2023)
- [2] T. Yoshimura et al., IEEE Transducers 2023, 457 (2023)
- [3] 吉村他, 第 15 回集積化 MEMS シンポジウム 6P4-D-4

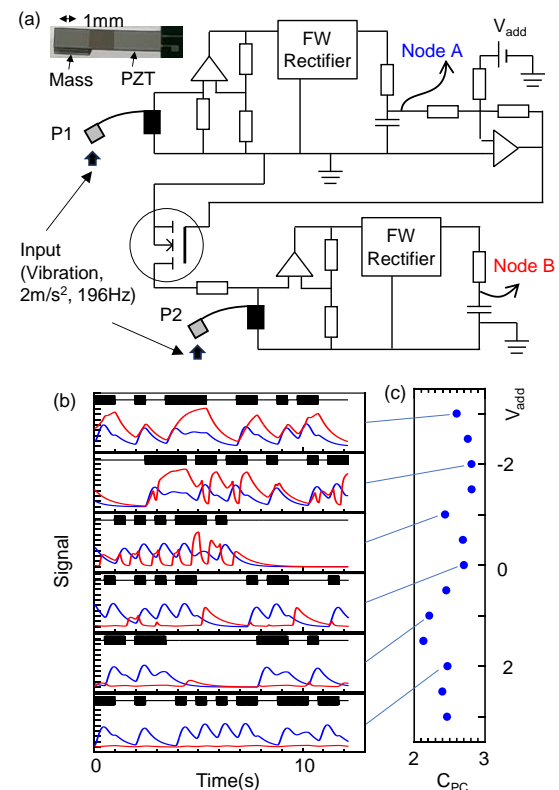


Fig. 1 (a) Equivalent circuit of RC system using two piezoelectric MEMS resonators. (b) Part of waveforms for the applied vibration (black), output from Node A (blue) and Node B (red) measured at various V_{add} . (c) Capacity for parity check task as a function of V_{add} .

圧電共振子リザーバーにおける非線形性と学習性能の関係

Relationship between nonlinearity and learning performance

in piezoelectric resonator reservoir

阪公大工, °庄野 武洋, 藤村 紀文, 吉村 武

Osaka Metro. Univ., °T. Shono, N. Fujimura, T. Yoshimura

E-mail: yoshimura@omu.ac.jp

【はじめに】物理リザーバーコンピューティングは、学習コストの少なさからエッジ AI への応用が期待されている[1]。我々は圧電共振子を用いたリザーバーコンピューティングについて研究しており、今回は 6 個の共振子を用いた結果を報告した[2]。本研究では、共振子が有する非線形性を有効活用する方法を探るための検討を行った。

【実験方法及び結果】実験には、前回と同様に片持ち梁構造の圧電共振子 6 個を用いた[2]。梁の先端に錘を貼り付けることで共振周波数を 72~76Hz の範囲に調整した。またこれらの共振子はハードばねの非線形性を有しており、印加する振動の周波数を掃引すると時計回りのヒステリシスを示す。6 個の共振子に約 5 m/s²の加速度の正弦振動を加えて得られた共振特性を Fig.1(a)に示す。すべての共振子において非線形性が現れていることがわかる。リザーバー性能の評価では、ビットレート 2 bit/s のランダムな 0 と 1 の入力信号で振幅変調して正弦振動を共振子に印加した。得られた出力電圧から 1 振動子当たり 10 点の仮想ノードを用いて Short Term Memory (STM) タスク、Parity Check (PC) タスクを行った。500 個の入力信号に対して 5 分割交差検証を行い、Memory Capacity (MC)、PC Capacity (PCC)の平均値を計算した。このような実験を振動の周波数を 71.8~76.2 Hz までの範囲で行い、学習性能を比較した。Fig. 1(b)に、それぞれの周波数での capacity を示す。ヒステリシスの存在する領域での MC、PCC の平均値はそれぞれ 3.1、2.7 であるのに対し、存在しない領域では 2.8、2.6 であり、0.3、0.1 しか低下していない。このように、非線形共振は学習性能に大きな影響はもたらさない結果となった。要因として、ヒステリシスが存在しない領域では、印加周波数と共振周波数の差によって生じる”うなり”が学習性能に影響した可能性を考えている。当日は、振動子を電氣的に結合した結果や周波数ヒステリシスのばらつきを変化させた場合の結果を用いて詳細に議論する予定である。

【参考文献】

- [1] G. Tanaka et al., Neural Networks **115**, 100-123(2019).
- [2] 庄野ほか, 第 84 回秋季応物, 23a-A302-7

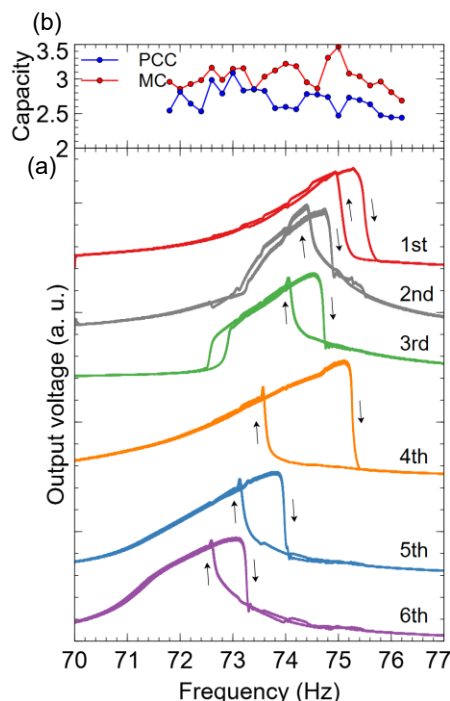


Fig. 1 (a) The resonance curve of the six piezoelectric resonators and (b) the capacities of short-term-memory and parity check tasks measured at various frequencies.

圧電振動子電流センサを用いた物理リザーバーコンピューティング

Physical reservoir computing using piezoelectric AC current sensor

阪公大工, [○](M1)西村 恵, 藤村 紀文, 吉村 武

Osaka Metro. Univ., [○](M1)K. Nishimura, N. Fujimura, T. Yoshimura

E-mail: yoshimura@omu.ac.jp

【はじめに】近年、メモリストや電気化学反応などの非線形性を持つ物理現象を利用した物理リザーバーコンピューティング（物理 RC）の研究が盛んに行われている[1,2]。高速演算の実証などが行われる一方で、センサと物理 RC を組み合わせることで、エッジデバイス上でデータ処理が可能なニューロモルフィックセンサの実現にも期待が集まっている[3]。本研究では圧電振動型電流センサの過渡的応答に着目し、物理 RC と組み合わせたニューロモルフィック電流センサを提案する。圧電振動型電流センサは従来手法では困難な平行電線を通る電流値の測定が可能であるが、電流値が大きくなると表れる非線形効果が原因で感度が低くなっている。そこでこの課題を物理 RC のアルゴリズムにより克服し、さらに平行電線の電流値のパターン認識をセンサデバイス上で行おうと考えた。本研究では、ベンチマークテストにより圧電振動子電流センサが物理 RC として機能することを確かめた。

【実験と結果】片持ち梁構造の圧電振動子の先端に永久磁石を取り付けて電流センサを作製した (Fig. 1)[4]。2 枚の圧電振動子を用いて音叉構造を形成することで高 Q 値化し、減衰時間の増加により短期記憶性を向上させている。この電流センサは、永久磁石を交流電流が流れる電線に近づけることで、電線周囲の交流磁場により永久磁石が振動し、圧電振動子が歪んで振動振幅に応じた電圧を出力する。素子の共振周波数は 60Hz に調節した。Q 値を算出したところ、約 75 であった。Fig. 2 に等価回路図を示す。二つの圧電振動子それぞれから得られた電圧をダイオード、キャパシタで整流平滑化している。また、トランジスタで 2 つの振動子を電氣的に結合して、一つ目の振動子からの出力によって二つ目の振動子の出力が変調されるようにした。入力信号として 1000 個の 0 と 1 のランダムビット列を生成し、それに応じて振幅を変調させた 60Hz の交流電流を平行電線に入力した。Fig. 3 に 3A の電流を入力した際の Parity Check(PC)タスクにおける決定係数 R^2 の delay 依存性を示す。 R^2 の総和である PC Capacity (PCC)は 1.87 であった。講演では、実践的なタスクの結果も加えて詳しく議論する。

【謝辞】本研究は岩谷科学技術研究助成の支援により実施されました。

【参考文献】

- [1] C. Du, et al., Nat. Commun. 8, 2204 (2017)
- [2] S. Kan, et al., Adv. Sci. 9, 2104076 (2021)
- [3] T. Mizumoto, et al., 35th IEE MEMS, 487 (2022)
- [4] T. Yoshimura, et al., Jpn. J. Appl. Phys. 58 SLLD10(2019)

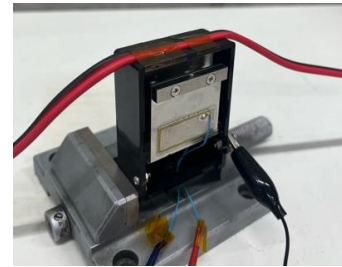


Fig. 1 Piezoelectric AC sensor.

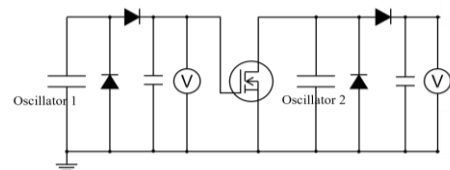


Fig. 2 Equivalent circuit of RC system using piezoelectric oscillator.

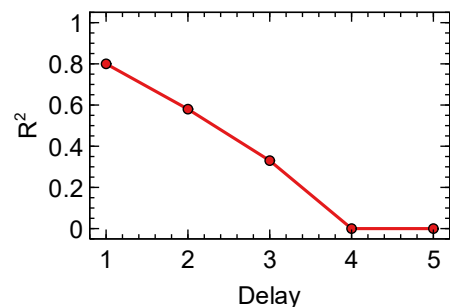


Fig. 3 Coefficient of determination for PC task

FS フォーカストセッション「AIエレクトロニクス」 | 一般セッション(口頭講演): FS.1 フォーカストセッション「AIエレクトロニクス」

[17p-A33-1~12] FS.1 フォーカストセッション「AIエレクトロニクス」

PR

secret place

[17p-A33-1]

[分科内招待講演] 強誘電メモリにおける多彩な現象と信頼性

○市原 玲華¹、鈴木 都文¹、吉村 瑤子¹、浜井 貴将¹、シリュコワ ビクトリア¹、松尾 和展¹、鈴木 正道¹、齋藤 真澄¹ (1.キオクシア株式会社)

[17p-A33-2]

FeFETリザーバーコンピューティングの信頼性における強誘電体分極量の影響

○名幸 瑛心¹、トープラサートポン カシディット¹、中根 了昌¹、竹中 充¹、高木 信一¹ (1.東大工)

[17p-A33-3]

FeFETソースフォロワーを用いた電圧動作リザーバーコンピューティングの実証

○鈴木 陸央¹、トープラサートポン カシディット¹、名幸 瑛心¹、中根 了昌¹、竹中 充¹、高木 信一¹ (1.東大工)

[17p-A33-4]

Experimental Demonstration of Reservoir Computing Using Anti-ferroelectric HZO Capacitors

○(D)SHINYI MIN¹, Kasidit Toprasertpong¹, Eishin Nako¹, Ryosho Nakane¹, Mitsuru Takenaka¹, Shinichi Takagi¹ (1.The Univ. of Tokyo)

[17p-A33-5]

Reservoir Computing Using Dynamic Polarization and Charge Coupling of Anti-ferroelectric HZO/Si FETs

○(D)SHINYI MIN¹, Kasidit Toprasertpong¹, Eishin Nako¹, Ryosho Nakane¹, Mitsuru Takenaka¹, Shinichi Takagi¹ (1.The Univ. of Tokyo)

[17p-A33-6]

{Mo_{154/152}}-ringを用いた情報処理への応用の検討

○(M1)佐々木 蒼人¹、大山 浩¹、松本 卓也¹、木元 克¹ (1.大阪大理)

[17p-A33-7]

電気化学反応による物理リザーバーコンピューティング

○(M2)谷口 瞬生¹、渡部 誠也¹、加藤 浩之¹、赤井 恵¹ (1.阪大院理)

[17p-A33-8]

導電性高分子ワイヤーを用いた物理リザーバーコンピューティング

○(M2)中島 涼介¹、渡部 誠也¹、加藤 浩之¹、赤井 恵¹ (1.阪大院理)

[17p-A33-9]

Physics-Guided Clustered Echo State Network for Prediction of Large spatiotemporally chaotic Dynamics

○Kuei-Jan Chu¹, Nozomi Akashi¹, Akihiro Yamamoto¹ (1.Kyoto Univ.)

[17p-A33-10]

多次元入力カレントニューラルネットワークにおける記憶容量

○東 青空¹、明石 望洋¹、山本 章博¹ (1.京大情報)

[17p-A33-11]

色素増感太陽電池を用いた自己発電型マルチタイムスケール人工光電子シナプス素子の創製と物理リザバ応用

○(D)小松 裕明¹、細田 乃梨花¹、生野 孝¹ (1.東理大先進工)

[17p-A33-12]

色素増感太陽電池を用いた可視光入力リザバー素子：多出力化による性能向上

○中川 元真¹、廣岡 正太郎¹、山田 亮¹、多田 博一¹ (1.阪大院基礎工)

強誘電メモリにおける多彩な現象と信頼性

○市原玲華、鈴木都文、吉村瑤子、浜井貴将、シリコワビクトリア、松尾 和展、
鈴木 正道、齋藤 真澄

キオクシア株式会社 先端技術研究所
E-mail: reika.ichihara@kioxia.com

薄膜 HfO_2 を用いた強誘電メモリは、低電圧で高速に動作すること、CMOS プロセスとの親和性が良いことから大きな注目を集め、人工知能向けインメモリコンピューティングをはじめとする様々な応用検討が行われている。強誘電メモリの一種である FeFET (Ferroelectric Field Effect Transistor) は、MIS (Metal Insulator Semiconductor) トランジスタのゲート絶縁膜に強誘電体を用い、電圧印可によって強誘電体の自発分極を反転させて閾値電圧を変調する不揮発メモリである。HfO₂-FeFET では自発分極の反転に加え、HfO₂ と Si チャネルとの間に生成した界面酸化膜の近くで電荷捕獲(放出)が生じ、性能に影響することが広く知られている。最近、電気特性の詳細な解析により、FeFET における電荷捕獲(放出)現象について、自発分極と連動するもの、しないもの、書込が誘起するもの、読出中に生じるものといった複数成分の存在が明らかになった (Fig. 1)。これらは、書込後の経過時間や書込/消去サイクルに対しても異なる依存性を有し、それぞれがメモリウィンドウ、データ保持特性、書込/消去サイクル耐性、さらにアレイ動作におけるデイスターブ耐性といった性能と様々な形で関連している。当日は、HfO₂ 強誘電メモリで生じる多彩な現象と、それらが基本動作や信頼性に及ぼす影響を紹介する。

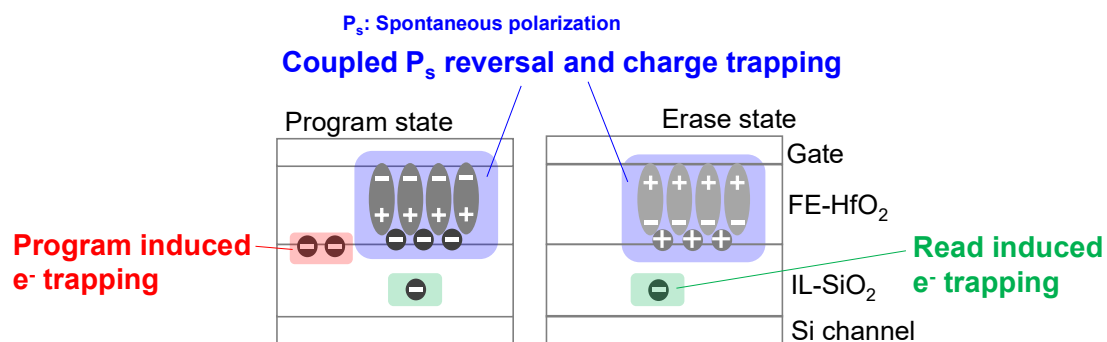


Fig. 1 Diverse phenomena occurring in HfO₂-FeFET

FeFET リザーバーコンピューティングの信頼性における強誘電体分極量の影響 Impact of amount of ferroelectric polarization on reliability of FeFET reservoir computing

東大工 〇名幸 瑛心, トプサートポン ガディット, 中根 了昌, 竹中 充, 高木 信一

〇E. Nako, K. Toprasertpong, R. Nakane, M. Takenaka, S. Takagi

Univ. Tokyo, School of Engineering

E-mail: nako@mosfet.t.u-tokyo.ac.jp

【はじめに】物理リザーバーコンピューティング [1]の実現には非線形かつ短期記憶特性をもつダイナミクスが重要であり、我々は強誘電体ゲート FET (FeFET)を用いたリザーバーコンピューティングを提案し実験的に検証を行ってきた[2,3]。FeFET は書き換え回数の増加に伴ってメモリ特性が劣化する性質を持つが、我々は、リザーバーコンピューティング性能は劣化しないことを確認している[4]。しかし、その物理的起源に関する定量的検討は十分に行われてこなかった。本研究では、デバイスが持つ動的特性の観点からリザーバーコンピューティング性能と FeFET 性能劣化の関係について調べたので、その結果を報告する。

【実験手法】本実験で用いる FeFET は TiN/Hf_{0.5}Zr_{0.5}O₂ (10 nm)/ SiO₂ (0.7 nm)のゲートスタック構造を持っており、Hf_{0.5}Zr_{0.5}O₂ は ALD 法により 300 °Cで堆積し、400 °Cでの熱処理を行う事で強誘電性を発現させた。Fig. 1 に示すように 2 値の時系列データを、パルスの正/負が時系列データの 1/0 に対応する、パルス幅 4 μ s、動作電圧振幅 3 V、中心電圧 0.5 V の三角波パルス列で構成された電圧波形に変換し、FeFET のゲート電極に印加した。ドレイン電流、ソース電流、基板電流をそれぞれ 1 パルスあたり 100 点測定し、得られた電流波形を連結して 300 個の仮想ノードを生成した。この仮想ノードにリッジ回帰を用いて重みづけを行った。リザーバーの性能評価には Short Term Memory (STM)タスクと Exclusive OR (XOR)タスク、Parity Check (PC)タスク[5]を用いた。入力パルスの累計数がある一定の数値に達するまでパルス入力を印加したのち、更に 10000 パルスを入力し、そのうちの 5000 パルスを用いた交差検証を行う事で逐次学習におけるリザーバー性能を評価した。強誘電体が持つ分極ダイナミクスの大きさを評価する為に P - V 測定によって強誘電体の残留分極量 $2P_r$ を評価した。更に動作電圧振幅を下げることによって $2P_r$ を疑似的に劣化させた時のリザーバー性能を評価し、リザーバー性能と $2P_r$ の関係について検討を行った。

【実験結果・考察】Fig. 2(a)には累計の入力パルス数を印加した後のリザーバー性能を示す。FeFET の電気的特性が安定する 10⁵ パルス以降、リザーバー性能はいずれのタスクにおいても安定している。一方で Fig. 2(b)に示す、累計の入力パルス数に対する $2P_r$ 値の実験結果から、パルス入力の繰り返しによって $2P_r$ の劣化が進行している事が分かる。この $2P_r$ 劣化がリザーバー性能に与える影響を調べるために Fig. 3(a)に示すように動作電圧振幅を下げることで $2P_r$ を疑似的に劣化させた。 $2P_r$ とリザーバー性能の関係を Fig. 3(b)に示す。 $2P_r$ が 1 μ C/cm² より大きい条件ではリザーバー性能は高い状態を維持していることから、一定以上の $2P_r$ があればリザーバー性能は劣化しないという事が分かる。

【結論】FeFET リザーバーは一定以上の $2P_r$ がある状態、即ち強誘電体の分極スイッチングによるダイナミクスがある程度残っている状態であればリザーバー性能は劣化しないことが分かった。FeFET のリザーバーコンピューティング応用は FeFET が持つ動的特性の劣化に対してロバストなものであることが分かった。

【謝辞】本研究は、JST-CREST (JPMJCR20C3)、JSPS 科研費 (23K20951)、JSPS 科研費 (24KJ0561)の支援を受けて実施された。

【参考文献】[1] G. Tanaka *et al.*, Neural Networks **115**, 100 (2019). [2] E. Nako *et al.*, VLSI symp., TN1.6 (2020). [3] K. Toprasertpong *et al.*, Commun. Eng. **1**, 21 (2022). [4] 名幸他, 秋季応物学会 12a-S101-3 (2021) [5] T. Furuta *et al.*, Phys. Rev. Applied **10**, 034063 (2018).

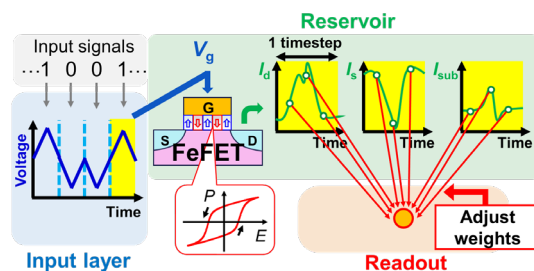


Fig.1 Processing flow of FeFET reservoir computing using I_d , I_s and I_{sub}

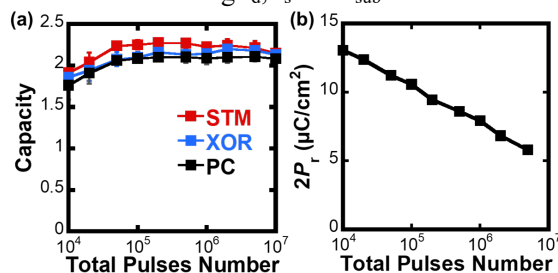


Fig.2 (a) Change in reservoir computing performance as a function of total pulse number (b) Degradation of $2P_r$

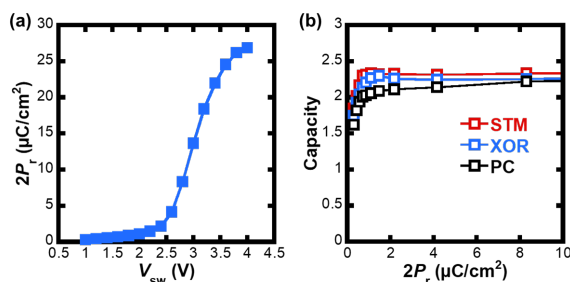


Fig.3 (a) Change in $2P_r$ as a function of swing voltage (b) Reservoir computing performance as a function of $2P_r$

FeFETソースフォロワーを用いた電圧動作リザバーコンピューティングの実証

Demonstration of voltage-operating reservoir computing by utilizing a ferroelectric source follower

東大院工 ○鈴木 陸央, トーブラサートポン カシディット, 名幸 瑛心, 中根 了昌, 竹中 充, 高木 信一

○R. Suzuki, K. Toprasertpong, E. Nako, R. Nakane, M. Takenaka, S. Takagi

(Univ. Tokyo, School of Engineering)

E-mail: rko_suzuki@mosfet.t.u-tokyo.ac.jp

【はじめに】先の研究で我々は高速かつ超低消費電力で時系列データの処理を行うことができるリザバーコンピューティング(RC)[1]を、強誘電体ゲートトランジスタ (FeFET) を用いて実装する事を提唱し[2]、実験的検証を行った[2][3]。本研究では、これまでFeFETの電流値を読み取ることによって行われてきたRCを電圧読み取りによって実現することで実装の際の消費電力を下げることを目指す。FeFETを利用してソースフォロワーを構成することで、FeFETの持つ強誘電体ダイナミクスを電圧として読み出しRCを行うことが可能であることを報告する。

【実験手法】本研究ではゲート長5 μm 、ゲート幅100 μm のTiN/Hf_{0.5}Zr_{0.5}O₂(10nm)/SiO₂(0.7nm)/Siの構造を持つ n -FeFETを用いた。このFeFETを用いてFig.1(a)に示されたような強誘電性ソースフォロワー(FeSF)を構成した。このFeSFのソース電位を1M Ω のハイインピーダンス入力を通して測定したものがFig.1(b)のようになる、こちらの入出力特性はFeFETの持つ強誘電性のダイナミクスを反映しており、強誘電性に起因するヒステリシス特性を持っていることが確認された。ここで0と1の無次元のデジタル入力信号列を中心電圧0.0V、振幅3.5Vでそれぞれ負と正のピーク値を持った三角波のパルス列に変換して、FeFETのゲート電極に入力し、これに伴い変化するFeSFのソース電位を測定した。またソースフォロワーのドレイン端に接続された電源電圧は0.5Vとし、入力ステップの時間幅 T_{step} を40 μs とした。ソース電位はひとつの入力パルスに対して200点の時間間隔毎に高速で測定され、これらの値を用いて仮想ノードを生成した[4]。200点の仮想ノードとリッジ回帰によって最適化された重みとの積和をとることによってリザバーシステムの出力を得た。本研究ではRCの性能を測る指標として短期記憶特性を評価するShort Term Memory (STM)タスク、短期記憶特性と非線形性の両方を評価するExclusive OR (XOR)タスクとParity Check (PC)タスクの遅延タスクを用いた[3][5]。それぞれの遅延タスクにおいてはターゲットの値とリザバーシステムによる推論の値との相関係数の二乗をとり、1つ前から9つ前までの各時間ステップにおいてこの値を用いてRCの性能をそれぞれ評価した。

【実験結果・考察】FeSFを用いたRC、FeFETの電流値を用いたRC、強誘電性を持たないFETにより構成されたソースフォロワーを用いたRCにおける遅延タスクの性能をそれぞれ示したものがFig.3である。この結果によると強誘電性を持たないFETを用いたソースフォロワーのRCでは、XOR、PCなどの非線形タスクをほとんど解決できないのに対して、FeSFを用いたRCではこれらの非線形タスクをある程度解決できている。このことからFeSFを用いてRCを行うことが可能であり、このFeSFを用いたRCの計算能力の起源が、FeFETの強誘電性のダイナミクスによるものであることが確認された。しかしFeSFを用いたRCの性能は、FeFETの電流値を用いたRCの性能よりも $T_{\text{delay}}=2$ の部分で小さくなってしまっており、応用的なタスクを行った際に、少なくない性能の低下が発生してしまうと考えられる。この性能の差異は、

FeSFを用いたRCではゲートソース間の容量カップリングなどの分極ダイナミクスに依存しない信号によって、本来読み取りたい強誘電性を反映した分極ダイナミクスの情報の読み取りが妨げられるようになるため、RCシステムの推論力が低下してしまっていると考えられる。

【結論】強誘電性を持つFeFETを用いたソースフォロワーを利用して、電圧の時間応答を読み取る方式によるリザバーコンピューティングの実証を行った。この方式により、回路実装の際の消費電力をさらに削減し、アプリケーションを容易にすることが期待される。

【謝辞】本研究は、JST-CREST (JPMJCR20C3)、JSPS科研費 (23K20951)の支援を受けて実施された。

【参考文献】[1] G. Tanaka *et al.*, Neural Networks **115**, 100 (2019), [2] E. Nako *et al.*, VLSI symp., TN1.6 (2020), [3] K. Toprasertpong, *et al.*, Commun. Eng., **1**, 21 (2022), [4] L. Appeltant *et al.*, Nat. Commun. **2**, 468 (2011), [5] H. Jaeger, GMD Report, 152, 1–60, (2001).

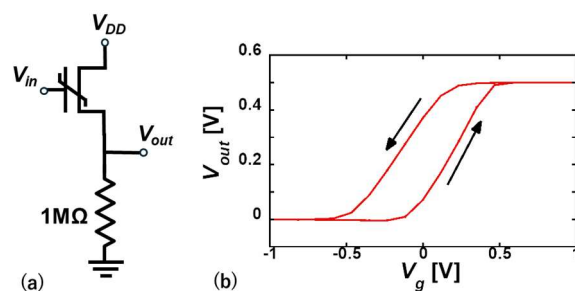


Fig. 1 (a) The schematic of ferroelectric source follower (FeSF), and (b) The V_g - V_{out} of FeSF.

Voltage-output FeFET reservoir

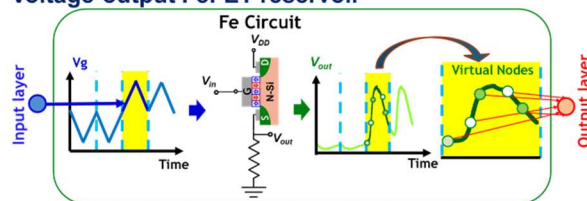


Fig. 2 The flow of voltage-output reservoir computing using FeSF.

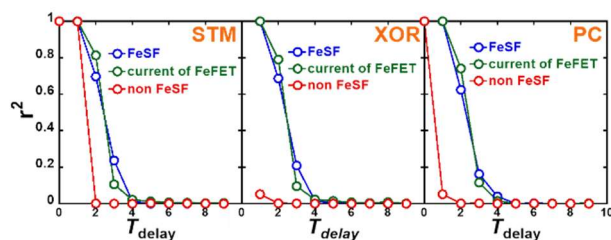


Fig. 3: Experimental results of STM and XOR and PC by using FeSF, current-mode FeFET, and nonferroelectric SF reservoir as a function of the delay time step.

Experimental Demonstration of Reservoir Computing Using Anti-ferroelectric HZO Capacitors

○S.-Y Min, K. Toprasertpong, E. Nako, R. Nakane, M. Takenaka, and S. Takagi

Department of Electrical Engineering and Information Systems, The University of Tokyo

E-mail: symin@mosfet.t.u-tokyo.ac.jp

[Introduction] The reservoir computing (RC) system is promising for sequential information processing with extremely-low computation cost by only training the output layer weights [1]. A reservoir in the RC system requires temporal memory properties and nonlinearity to transform time-series inputs into high-dimensional data for efficient learning. We have reported a ferroelectric (FE) $\text{Hf}_{1-x}\text{Zr}_x\text{O}_2$ (HZO)-based RC system utilizing the temporal-spatial polarization dynamics of FE-HZO [2-4]. However, the single polarization switching of FE-HZO is insufficient to diversify the output response. Unlike a monotonous switching for FE-HZO, anti-ferroelectric (AFE)-HZO exhibits double polarization switching, which allows complicated response signals. In this study, we propose an effective RC system using an AFE-HZO-based metal/ferroelectric/metal (MFM) capacitor.

[Experiments] A 16 nm TiN was deposited on a p⁺-type Si substrate as the bottom electrode (BE) of MFM structure. Then, a 10 nm-thick HZO layer was deposited by ALD at 300 °C with five different Zr/(Hf+Zr) ratios: 0, 25, 50, 75, and 100 %. Subsequently, a 16 nm-thick TiN top electrode (TE) was covered by sputtering and HZO crystallization was conducted by using RTA at 400 °C for 30 sec in an N₂ atmosphere. Finally, Al was deposited as the contact electrodes and patterned with a 60 μm-diameter circular-shape. To examine the RC capability of HZO capacitors, 10⁴ time-series random binary data $u(n)$ (discrete time step $n = 1, 2, \dots$) is encoded into a triangular-shaped waveform $v(t)$ and applied to the TE of the HZO capacitor. The polarization switching current is read through the BE and sampled as virtual nodes for the training/testing phases of RC. Two computational tasks were conducted as the indexes of RC capacities of the HZO capacitor reservoir: Short-Term Memory (STM; infer the value of the input before T_{delay} -step) and Parity Check (PC; infer the parity during the recent T_{delay} -step and the current input for evaluating nonlinearity).

[Results] Figs. 1(a, b) show the P - V hysteresis loop, remanent polarization (P_r), and coercive voltage (V_c) values of the HZO capacitors with different Zr contents. The [Zr] = 0 and 50 % show paraelectric behavior and typical FE hysteresis loop, respectively. Further increasing Zr content leads to a hysteresis loop thinning at zero-bias, resulting in AFE-like double-loop polarization switching. P_r of [Zr] = 75 % is higher than that of 100 % due to partial o-phase in HZO system. The capability of HZO capacitors to nonlinearly transform the input $v(t)$ into high-dimensional reservoir states $x(n)$ can be visualized using t-SNE analyses. In Fig. 2, the AFE-HZO capacitor with [Zr] = 75 % successfully separates 3-bit binary input $v(t)$ into 8 patterns of $x(n)$. Figs. 3(a, b) show the correlation coefficient r^2 between computed output $y(n)$ and target $d(n)$ as a function of T_{delay} -step for STM and PC tasks, and RC capacities (summing r^2 over the T_{delay} -step), respectively. It is found that the highest RC capacities are achieved under the AFE-HZO capacitor with [Zr] = 75 %, indicating that its dynamical polarization switching enhances RC performances. Fig. 4 shows the normalized history-dependent current response and differences between the input $v(t)$ with same $u(n)$ and $u(n-1)$ but different $u(n-2)$. A large difference in the current response is advantageous to distinguish the input patterns. The capacitor with [Zr] = 50 % shows a small difference due to a single polarization switching of FE-HZO, and that with [Zr] = 100 % also has a small difference despite its AFE property due to low polarization switching with small hysteresis loop. Meanwhile, [Zr] = 75 % has large and complicated response differences due to dynamical double polarization switching, resulting in the highest RC capacity.

[Conclusion] We have proposed a high potential of AFE-HZO capacitor for an effective RC system. The rich polarization dynamics of AFE-HZO enhance RC performance by diversifying the time-series response signals.

[References] [1] G. Tanaka et al., Neural Netw., 115, 100 (2019). [2] E. Nako et al., VLSI Symp., TN1.6 (2020). [3] K. Toprasertpong et al., Comms. Eng., 1, 21 (2022). [4] S. Takagi et al., IEDM, 22.2 (2023).

[Acknowledgments] This work was supported by JST CREST Grant Number JPMJCR20C3 and JSPS KAKENHI Grant Number 23K20951 and 24KJ0625, Japan.

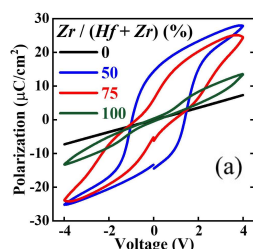


Fig. 1 (a) P - V loops of HZO capacitors with [Zr] = 0, 50, 75, and 100 %. (b) $2P_r$ and $2V_c$ values of HZO capacitors with different Zr contents.

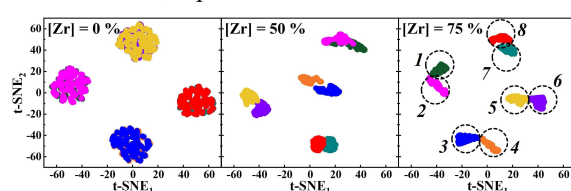


Fig. 2 t-SNE analyses of RC for 3-bit input data for HZO capacitors with [Zr] = 0, 50, and 75 %.

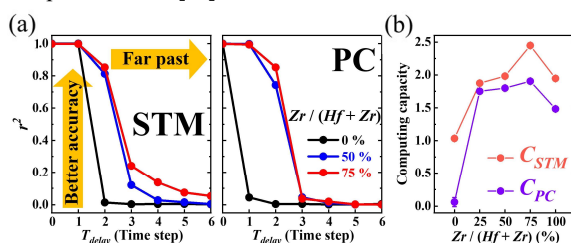


Fig. 3 (a) r^2 of the STM and PC tasks for HZO capacitors with [Zr] = 0, 50, and 75 %. (b) RC capacities of STM and PC tasks for HZO capacitors with different Zr contents.

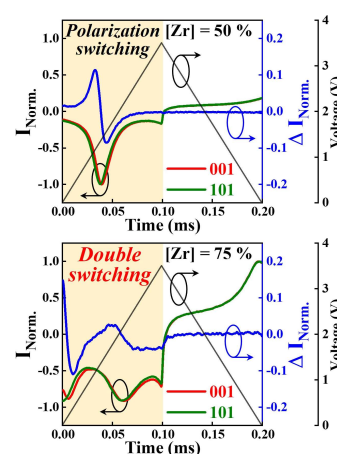


Fig. 4 Normalized history-dependent current responses and differences for HZO capacitors with [Zr] = 50 and 75 %.

Reservoir Computing Using Dynamic Polarization and Charge Coupling of Anti-ferroelectric HZO/Si FETs

○S.-Y Min, K. Toprasertpong, E. Nako, R. Nakane, M. Takenaka, and S. Takagi

Department of Electrical Engineering and Information Systems, The University of Tokyo

E-mail: symin@mosfet.t.u-tokyo.ac.jp

[Introduction] Reservoir computing (RC) offers real-time information processing with low computation cost by only training the output layer weights and is promising for edge-AI applications [1]. A reservoir in the RC system needs to convert sequential input data into high-dimensional node states for effective learning. We have demonstrated an $\text{Hf}_{1-x}\text{Zr}_x\text{O}_2$ (HZO)/Si FeFET-based RC system utilizing the ferroelectric polarization dynamics [2-4]. However, the insufficient polarization dynamics of FeFETs are still limiting the performance. Meanwhile, the anti-ferroelectric (AFE) properties with double polarization switching can be easily realized by increasing the Zr content in HZO films, which allows us to use complicated response signals. In this study, we propose an effective RC system using HZO/Si AFE-FETs with rich polarization dynamics and polarization-charge coupling.

[Experiments] The gate stacks of HZO/Si FETs with different Zr contents were fabricated as follows. The SiO_2 interfacial layer was chemically grown on a p-type Si substrate to improve the MOS interface. Subsequently, a 10 nm-thick HZO layer was deposited by ALD at 300 °C with five different Zr/(Hf+Zr) ratios: 0, 25, 50, 75, and 100 %. Then, a 16 nm-thick TiN metal gate was deposited and HZO crystallization was conducted by RTA at 400 °C for 30 sec in an N_2 atmosphere. For the HZO/Si FETs-based RC system, time-series binary input $u(n)$ (discrete time step $n = 1, 2, \dots$) is encoded into a triangle waveform $v(t)$ and applied to the gate terminal. The $I_d(t)$ response is sampled as virtual nodes (VNs) for the training/testing phases of RC. We evaluated Short-Term Memory (STM; infer the value of the input before T_{delay} -step), Temporal-exclusive OR (XOR; infer the XOR between the input before T_{delay} -step and the current input), and Parity Check (PC; infer the parity during the recent T_{delay} -step and the current input) tasks as the indexes of RC capabilities. Here, the XOR and PC tasks can evaluate both short-term memory and nonlinearity.

[Results] Fig. 1(a) shows the P - V_g hysteresis loop for HZO/Si FETs with different Zr contents. The substrate and S/D terminals are connected to ensure that the MOS surface is in equilibrium during P - V_g measurement. The AFE properties with four polarization switching current peaks can be successfully observed in HZO/Si FETs with [Zr]=75 % (Fig. 1(b)). Fig. 2 shows the $I_d(t)$ responses of HZO/Si FETs with different Zr contents under same $v(t)$ input waveform, in which high/low peaks correspond to 1/0 binary input $u(n)$. The different $I_d(t)$ output responses are observed, dependent on the past input-history $u(n-1)$, $u(n-2)$,... even when the present input $u(n)$ is the same, attributed to temporal-spatial polarization dynamics of the HZO layer. We examine the RC performance by utilizing VNs for $I_d(t)$ responses, where a large difference in history-dependent $I_d(t)$ response is advantageous to distinguish the input patterns. Figs. 3(a) and (b) show the correlation coefficient r^2 between computed output $y(n)$ and target $d(n)$ as a function of T_{delay} -step and the total RC capacities (summing r^2 over the T_{delay} -step) for each computing task of HZO/Si FETs with different Zr contents, respectively. High RC capacity has been achieved for AFE-FETs and [Zr]=75 % exhibits the highest nonlinearity score. The nonlinear mapping capability of HZO/Si FET reservoirs can be evaluated by t-distributed stochastic neighbor embedding (t-SNE) analyses [3, 5], which visualize the distribution of high-dimensional reservoir state $x(n)$. Fig. 4 shows the separation of $x(n)$ for 4-bit input $v(t)$. A variety of different patterns are determined by nonlinearly transforming the input $v(t)$ into high-dimensional $x(n)$, determined by the present input $u(n)$ and past-history from $u(n-1)$ to $u(n-3)$. The HZO/Si AFE-FETs with [Zr]=75 % achieve the highest number of distinguishable patterns of 12~13, indicating that its dynamical double polarization switching enhances the RC performance.

[Conclusion] We have experimentally verified that the AFE-HZO has a high potential for an effective RC system. The rich polarization dynamics and polarization-charge coupling of HZO/Si AFE-FETs enhance RC capability.

[References] [1] G. Tanaka et al., Neural Netw., 115, 100 (2019). [2] E. Nako et al., VLSI Symp., TN1.6 (2020). [3] K. Toprasertpong et al., Comms. Eng., 1, 21 (2022). [4] S. Takagi et al., IEDM, 22.2 (2023). [5] L. van der Maaten et al., J. Mach. Learn. Research, 9, 2579 (2008).

[Acknowledgments] This work was supported by JST CREST Grant Number JPMJCR20C3 and JSPS KAKENHI Grant Number 23K20951 and 24KJ0625, Japan.

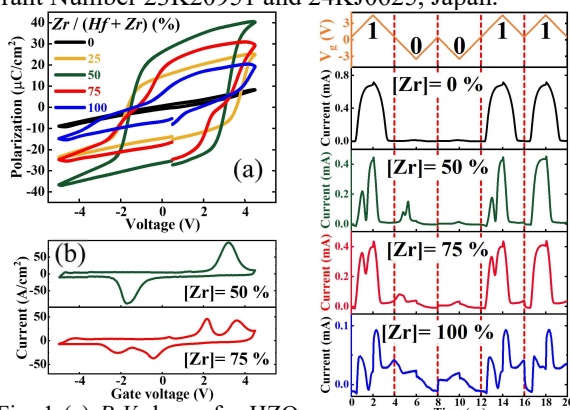


Fig. 1 (a) P - V_g loops for HZO FETs with different Zr contents. (b) I - V_g characteristics for HZO FETs with [Zr]=50 and 75 %.

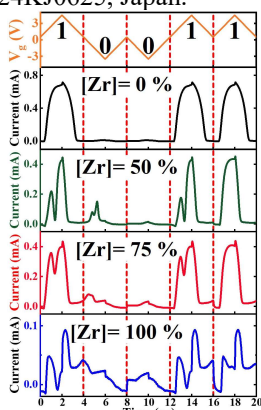


Fig. 2 $I_d(t)$ responses of HZO FETs [Zr]= 0, 50, 75, and 100 %.

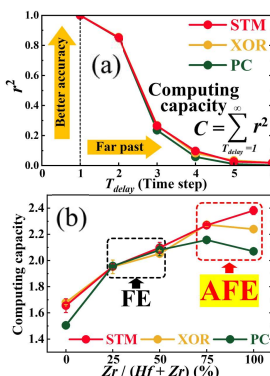


Fig. 3 (a) Correlation coefficient r^2 as a function of T_{delay} -step and (b) RC capacities for HZO FETs with different Zr contents.

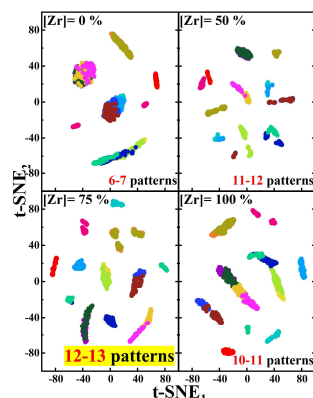


Fig. 4 t-SNE analyses of the $I_d(t)$ responses of HZO FETs with [Zr]= 0, 50, 75, and 100 % for 4-bit digital input.

{Mo_{154/152}}-ring を用いた情報処理への応用の検討

Exploration of the application of information processing using a {Mo_{154/152}}-Ring

阪大院理¹, °(M1) 佐々木 蒼人¹, 大山 浩¹, 松本 卓也¹, 木元 克¹

Osaka Univ.¹, °Aoto Sasaki¹, Hiroshi Ohoyama¹, Takuya Matsumoto¹, Suguru Kimoto¹

E-mail: sasakia23@chem.sci.osaka-u.ac.jp

【序】ニューラルネットワークの一種であるリザーバーコンピューティング(RC)のうち、リザーバー層で行われる演算を物理現象に置換したものは物理リザーバーと呼ばれ近年注目を集めている[1]。実用的な RC デバイスには、リザーバー層内に非線形特性、記憶特性、高次元性という3つの特性が必要である。ポリオキソメタレート(POM)は、高い電子受容性を持ち、他段階の酸化、還元によりクラスターの金属原子が混合原子価状態を取るため、特異な物性を示すことが知られている。本研究では、POM の一種である {Mo_{154/152}}-ring (Fig 1. Inset) の電気特性に注目し、RC デバイスとしてのデモンストレーションとして手書き文字の文字認識タスクを行った。

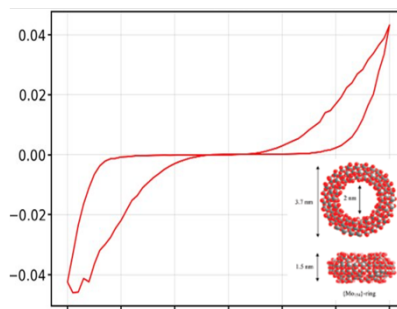


Fig 1. I-V curve of POM with the nano-gap electrode. Inset is POM structure [2].

【実験】電極上に溶液を滴下し、乾燥させることで {Mo_{154/152}}-ring 分子ネットワークを形成した。測定は 10⁻⁴ Pa の真空環境下にて行い、1 入力 1 出力端子の構成で、電気伝導特性の計測を行った。POM に 4 bit の各パターン(16 通り)に対する電気パルス電圧を印加し、読み取り電圧において電流値を測定した。同様に、多入力 1 出力端子の構成でも実験を試みた。文字認識タスクのデータセットには MNIST を使用し、階調は 0 以外を全て 1 に置換して 2 値化した。

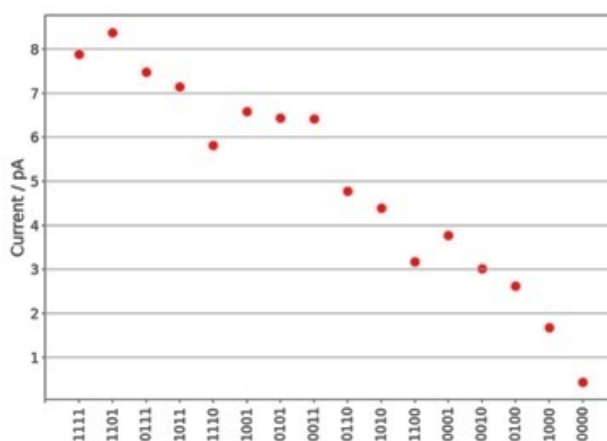


Fig 2. Identifiable current versus pulse voltage.

【結果と考察】作成したデバイスの I-V 特性を Fig. 1 に示す。デバイスは非線形応答と記憶特性を示すことがわかった。電圧をパルスパターンとして入力した時の電流測定値は各パターンを十分分類できていることを示唆している (Fig 2)。このデータを用いて手書き文字の分類タスクを行ったところ、正答率 0.84~0.97 の結果が得られた (Fig 3)。講演では入力を他入力にしたときの I-V 特性と、それを用いたタスクについても議論する。

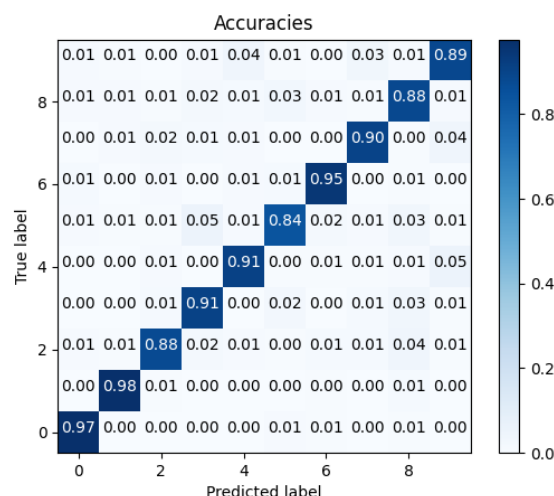


Fig 3. Accuracy of number character recognition.

【参考文献】

- [1] G. Tanaka et al., *Neural Networks*, **115**, 100 (2019).
- [2] T. Akutagawa et al., *Langmuir*, **24**, 231 (2008).

電気化学反応による物理リザーバーコンピューティング

Physical Reservoir Computing by Electrochemical Reactions

阪大院理¹、[○](M2)谷口 瞬生¹, 渡部 誠也¹, 加藤 浩之¹, 赤井 恵¹Osaka Univ.¹, [○]Shunki Taniguchi¹, Seiya Watanabe¹, Hiroyuki S. Kato¹, Megumi Akai-Kasaya¹

E-mail: taniguchis22@chem.sci.osaka-u.ac.jp

【序論】我々の研究グループは、溶液内のイオンがもたらす電気化学応答のリザーバーコンピューティング(RC)応用を進めてきた^[1]。本研究では、酸化還元種を含む溶液への電圧印加により発生するファラデー電流の非線形性や短期記憶に着目し、RC性能向上への寄与を報告する。

【実験手法】実験装置の概要を Fig.1 (a)に示す。ガラス状カーボン電極、Ag/AgCl 参照電極、Pt カウンター電極の三電極系で実験を行った。ポテンシostatと関数発生器で溶液の電位制御を行い、応答電流を記録した。測定溶液には 1 M NaCl と 2 mM または 4 mM の $K_3[Fe(CN)_6]$ を含む水溶液を用いた。非線形性は、ノーマルパルスボルタンメトリー(NPV)曲線により評価した。短期記憶性能の評価では、Fig.1(b)のような 4 パルス矩形波電圧列を溶液に印加し、遅延 $k = 1, 2, 3$ の電圧値 E を変動させて $k = 0$ の電流値を比較することで、過去の入力に現在のファラデー電流出力に及ぼす影響を調査した。最後に複数の電位幅で、パルス幅 1 s、511 パルスのランダム矩形波電圧列を用いた RC 計算で RC 性能の評価を行った。評価には、次式で表される記憶容量^[2]を用いた (P_n : n 次 Legendre 多項式)。

$$MC_k^n = \frac{\text{cov}^2(P_n(t-k), Y_k^n(t))}{\sigma^2(P_n(t-k)) \cdot \sigma^2(Y_k^n(t))}$$

【実験結果】Fig.1 (c)は 2 mM $K_3[Fe(CN)_6]$ 水溶液

の NPV 曲線であり、非線形的な電圧電流変換の挙動が確認された。さらに、複数の電位幅条件 (0.07~0.25 V, 0.25~0.43 V, 0.07~0.43 V) を物理ノードとして RC 計算を行ったところ、入力信号の Legendre 変換予測精度は $MC^{n=1}$: 0.992, $MC^{n=2}$: 0.986, $MC^{n=3}$: 0.912 となり、高次元の変換において高い精度を示した。短期記憶の評価では、Fig.1 (d)から過去の入力信号電位が負に向かう程、 $k = 0$ の電流が小さくなる傾向が得られた。これは電極表面付近の酸化体/還元体の濃度比が過去の影響を引き継ぐことを意味し、短期記憶として作用することが期待できる。Fig.1 (e) は、電位幅 7 種類、3 点の仮想ノードを設けた合計 21 ノードの条件における 4 mM $K_3[Fe(CN)_6]$ 水溶液の RC 計算の結果である。Fig.1 (f) は、同条件でファラデー電流の無い 1 M NaCl 水溶液について RC 計算を行った結果である。これらの結果より、 $k = 0, 1$ での高次元変換と $k = 2$ の短期記憶がファラデー電流によって引き出されることがわかった。一方で、 $k = 3$ 以上の遅延や $MC_{k=2}^n$ の高次元変換に関しては予測できなかった。発表では、電極での反応速度や酸化体/還元体の拡散などの電気化学現象に基づき、RC 性能向上について検討した結果を報告する。

【文献】[1] Kan et al., *Adv. Sci.* 2021, **9**, 2104076. [2] Jeager, *GMD Rep.* 2001, **152**, 24520

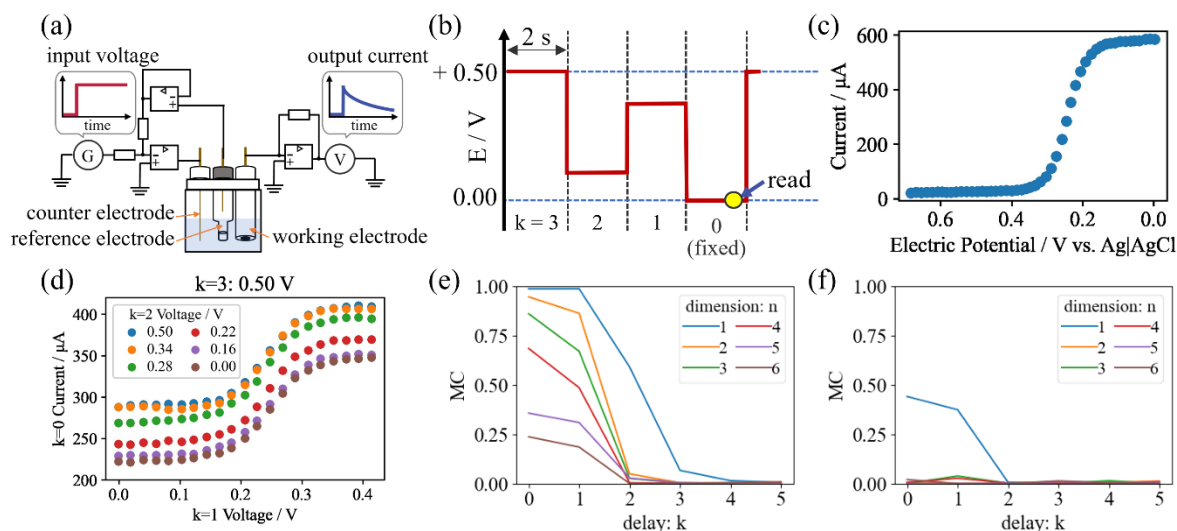


Figure 1: (a) Experimental setup. (b) A schematic diagram of square wave signals consisting of four components. (c) NPV diagram of the $K_3[Fe(CN)_6]$ solution. (d) Variation of Faradaic current influenced by past input voltage. (e, f) Reservoir calculation results of (e) 4 mM $K_3[Fe(CN)_6]$ with 1 M NaCl, and (f) 1 M NaCl.

導電性高分子ワイヤーを用いた物理リザーバーコンピューティング

Physical reservoir computing using conductive polymer wire.

阪大院理¹ ○中島 涼介¹, 渡部 誠也¹, 加藤 浩之¹, 赤井 恵¹

Osaka Univ.¹, °Ryosuke Nakajima¹, Seiya Watanabe¹, Hiroyuki S. Kato¹, Megumi Akai-Kasaya¹

E-mail: nakajimar22@chem.sci.osaka-u.ac.jp

はじめに：導電性高分子である PEDOT:PSS のワイヤーは、モノマーの EDOT を含んだ前駆体溶液に浸した電極間に矩形波交流電圧を印加することで、電解重合により電極間を架橋するように生長する(Fig. 1)。我々の先行研究では、この PEDOT:PSS ワイヤーの径を陽極側と陰極側で非対称にすることで、ワイヤーのコンダクタンスが印加電圧に対してメモリスティブに変化することを報告した[1]。本研究では、複数の PEDOT:PSS ワイヤーを接続した回路が示すコンダクタンス変化に着目し、物理リザーバーコンピューティングに利用した際の性能を調査した。

実験：モノマー(EDOT)とドーパント(PSS)を含む前駆体溶液を電極間に滴下し、矩形波交流電圧を印加することで PEDOT:PSS ワイヤーを生長させた。その後、モノマーの酸化電位以上の正電圧パルスを複数回印加し、陽極近傍での電解重合によってワイヤー径を非対称化させた。このワイヤーに、電解質溶液中でワイヤー径が大きい側から正電圧パルスを印加するとコンダクタンスは上昇し、負電圧パルス印加するとコンダクタンスは低下する。このワイヤーを、回路として直列または並列に 2 本接続した試料を作製した(Fig. 2)。リザーバー計算に用いる入力データを 0 または 1 の乱数列とし、0 を負電圧パルス、1 を正電圧パルスとして試料に印加した。電圧パルス印加毎に各ワイヤーのコンダクタンスを測定し、その値をノードとして用いた。ベンチマークタスクとして NARMA2 と記憶容量(MC)を採用し、情報処理性能の評価を行った。

結果と考察：PEDOT:PSS ワイヤーを直列に接続した試料の NARMA2 タスクにおけるリザーバーの出力を Fig. 3 に示す。この正規化平均二乗誤差(NMSE)は 0.186 であり、時系列予測ができていえる。一方、PEDOT:PSS ワイヤーを並列接続した試料では、NARMA2 の NMSE は 0.596 となり、直列接続と比較して性能が劣る結果となった。MC においても、直列接続では 1.76 bit、並列接続では 1.50 bit となり、直列接続のほうが良い性能を示した。直列接続では、ワイヤーのコンダクタンスが変化すると、各ワイヤーにかかる電位差が変化し、続くコンダクタンス変化に影響を与える。コンダクタンス変化に伴うワイヤー同士の相互作用によるダイナミクスが、リザーバーの性能に大きく関わっていると考えられる。

参考文献：[1] N. Hagiwara et al., *Polymers*, **13**, 312 (2021)

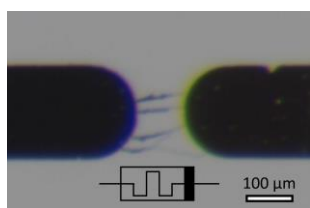


Fig. 1 PEDOT:PSS wire

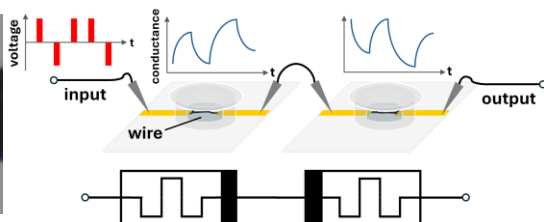


Fig. 2 Operation scheme for series connection

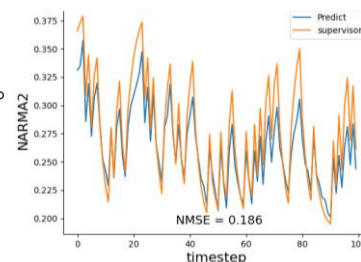


Fig. 3 Result of NARMA2 task

Physics-Guided Clustered Echo State Network for Prediction of Large spatiotemporally chaotic Dynamics

(M2) ○ Kuei-Jan Chu¹, Nozomi Akashi¹, Akihiro Yamamoto¹

Kyoto University¹

E-mail: zhu.guiran.72s@st.kyoto-u.ac.jp

Chaos is aperiodic long-term behavior in a deterministic system, and the prediction of chaotic dynamical system states (e.g., as in weather forecasting) is a common and essential task with many applications in science and technology. Chaotic dynamical systems have a property that nearby trajectories separate exponentially fast, so it is tough to predict the future states. Recently, data-driven machine learning techniques have demonstrated promising results in predicting chaotic dynamical system states. In particular, echo State Networks, a type of recurrent neural network, have achieved model-free short-term prediction and attractor reconstruction of chaotic dynamical systems. [1, 2]. However, for complex dynamics prediction, the training data need to be enormous, and the learning will be inefficient, which motivates us to leverage the physics information, e.g., the spatial structures in the target dynamical system, in the network design.

In this work, we exploit spatial coupling information of the target system as a guide for our proposed structure called physics-guided clustered echo state network (PGClustered ESN) for tasks to predicate the future states of large spatiotemporally chaotic dynamical systems. As Figure 1.A shows, in our proposed PGClustered ESN, we make multiple clusters in a big reservoir, and each cluster corresponds to one variable in the target dynamical system, using the coupled variables as input as well. Each cluster is just connected to the clusters whose corresponding variables are coupled with their own. Here, we demonstrate the effect of our proposed model for two spatiotemporally chaotic systems called coupled map(CML) lattice and Lorenz 96, which are discrete- and continuous-time systems, respectively. As Figure 1.B and 1.C shows, our proposed models work better compared to the standard ESNs on the CML tasks, in both short-term prediction and attractor reconstruction. Therefore, we know the coupling structures in target systems contribute to improving the performance of spatiotemporally chaotic dynamics prediction.

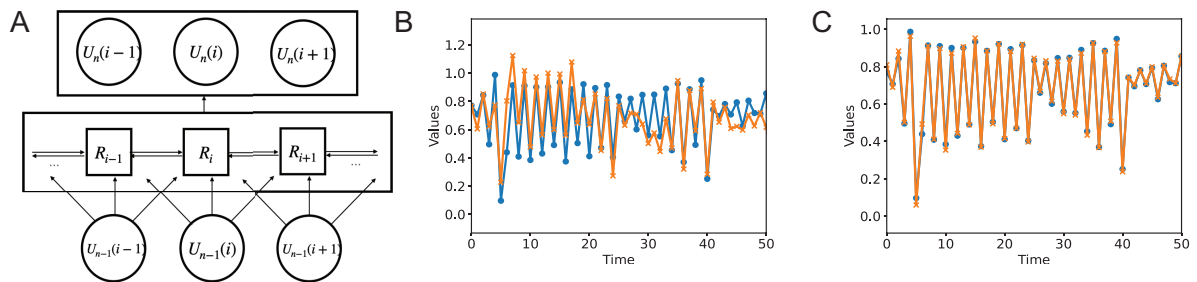


Figure 1: A. Architecture of PGClustered ESN; B, C. Open-loop prediction by ESN and PGClustered ESN for CML, The blue and orange lines represent target and prediction signals, respectively.

References

- [1] Lu, Z., Hunt, B. R., & Ott, E. (2018). Attractor reconstruction by machine learning. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 28(6).
- [2] Pathak, J., Hunt, B., Girvan, M., Lu, Z., & Ott, E. (2018). Model-free prediction of large spatiotemporally chaotic systems from data: A reservoir computing approach. *Physical review letters*, 120(2), 024102.

多次元入力リカレントニューラルネットワークにおける記憶容量

Memory Capacity of Recurrent Neural Networks with Multi-dimensional Input

京都大学 ○(B) 東 青空、明石望洋、山本章博

Kyoto University ○Aozora Higashi, Nozomi Akashi, Akihiro Yamamoto

E-mail: higashi.aozora.56z@st.kyoto-u.ac.jp

近年、機械学習の中で文章のような時系列データの処理手法が盛んに研究されており、過去の入力の記憶に関する定量的な解析は効率的な時系列処理に知見を与えると考えられる。そのなかで、計算コストや記憶性能に秀でたリカレントニューラルネットワーク (RNN) であるリザーバー計算が注目されている。Jaeger によって提案されたエコーステートネットワーク (ESN) は [1]、リザーバー計算の中でも広く使われているモデルであり、記憶容量の定式化 [2] をはじめとして多くの解析がなされている。中でも White らの論文 [3] では、ノイズを含んだネットワークの記憶容量について詳細に調べられているが、[2,3] いずれも、1次元の入力を前提としている。

本研究では、[3] の議論におけるノイズを異なる入力とみなすことで、多次元入力の RNN における記憶容量の性質を調査した。結果として図 1A のような線形の RNN で、入力が時間と次元の両方について独立である場合に、各次元の入力に対する記憶容量の総和がネットワークのノード数に一致することを理論的・数値的に示した。図 1B は、入力の次元数でノード数をスケールしたネットワークの記憶容量の総和を表したグラフである。いずれの条件でも記憶容量の総和がノード数に近い値を取ることが確認できた。

実用上の課題では、二次元の位置情報や高次元に埋め込まれた単語など、入力を多次元として扱うことが一般的である。本研究で得られた理論は時空間的に独立な多次元分布を仮定しているものの、多次元入力の機械学習における記憶能力の評価に貢献すると期待される。

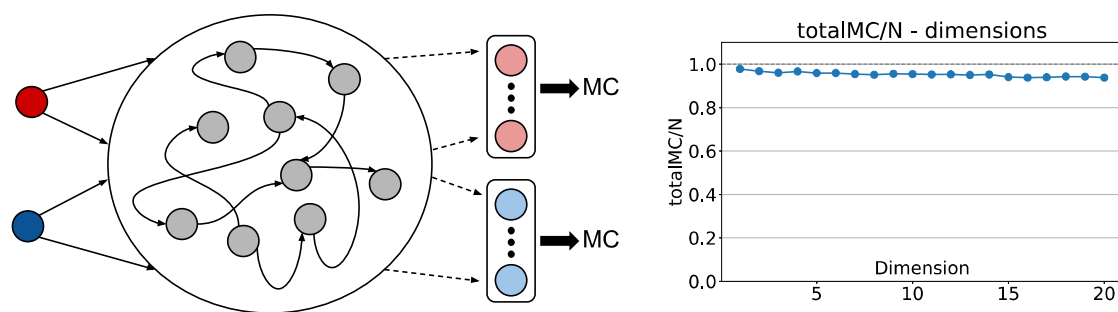


Fig. 1: A, B. A: blue/red nodes on the left represent inputs, grey nodes represent computational nodes in the RNN, and light-red/light-blue nodes represent outputs for respective input reconstruction tasks with varying delays. Each MC is calculated with corresponding outputs. B: x-axis: number of input dimensions, y-axis: sum of all MCs for each dimension divided by the number of nodes

[1] H. Jaeger, German National Research Center for Information Technology GMD Technical Report, 148(34), 13 (2001).

[2] H. Jaeger, GMD Forschungszentrum Informationstechnik (2001).

[3] L. White *et al.*, Physical review letters 92(14), 148102 (2004).

色素増感太陽電池を用いた自己発電型マルチタイムスケール人工光電子シナプス素子の創製と物理リザバ応用

Fabrication of a self-powered artificial optoelectronic synapse using DSC operatable at multi-timescale and application in physical reservoir computing.

東理大先進工 ○小松 裕明, 細田 乃梨花, 生野 孝

Tokyo Univ. of Science, °Hiroaki Komatsu, Norika Hosoda, Takashi Ikuno

E-mail: tikuno@rs.tus.ac.jp

人間の視覚野にヒントを得た, 人工光電子シナプス素子を用いた物理リザバコンピューティング(PRC)は, センサ内で直接信号処理が可能なインセンサ型 PRC として注目されている^[1]. これまで, 人工光電子シナプスはバイアス電圧の印加や界面でのバンド曲がりを利用した photocurrent 型が多く報告されている^[2]. しかし, photocurrent 型はバイアス用の外部回路が必要な点や出力電流が小さいなどの課題がある. そこで, 自立型のエッジ AI デバイスの実現に向けて, 我々は photovoltaics 型の人工光電子シナプスに着目している.

ところで, 時定数はリザバ層の動的応答を決定する重要なパラメータであり, PRC の計算性能指標の一つである記憶容量(MC)との相関が指摘されている^[3]. これまで我々は, リザバ層の時定数が入力のパルス幅(T_p)と同程度のとき, 最大の MC が得られることを明らかにした^[4]. したがって, 異なるタイムスケールの現象に対応するためには, 入力データのタイムスケールに応じてリザバ層の時定数を制御する必要がある. しかし, 材料を変えずに photovoltaics 型人工光電子シナプス素子の時定数を制御した報告はない.

本研究では, 光強度に応じて開放電圧の過渡応答の時定数が変化することが知られている色素増感太陽電池 (DSC) ^[5]に着目し, DSC をベースとした photovoltaics 型光電子シナプス素子を作製し, PRC 応用への有効性を評価した.

FTO ガラス上に, TiO_2 多孔質膜を作製し, SQ2 色素を吸着させて光極とした. 対極, 電解液はそれぞれ Pt, ヨウ素系電解液を用いた. 作製した DSC に単色光 ($\lambda = 658 \text{ nm}$) パルスを照射し, 光強度が開放電圧の過渡応答に与える影響を調べた. 次に, 作製した素子を物理リザバとして動作させ, short-term memory task により MC を評価した.

光強度により, 増加時定数 τ_{rise} は $8.9 \text{ ms} - 2.9 \text{ s}$ まで変化した (図 1a). 図 1b に入力データの T_p に対する MC を示す ($T_p: 1 - 1000 \text{ ms}$, $P: 0.075 - 10 \text{ mW}$). 光強度が低いとき, T_p は 500 ms で最大の MC (MC = 1.1) が得られた. 光強度を $1, 10 \text{ mW}$ に増加させると, 最大の MC が得られる T_p はそれぞれ 100 ms , 50 ms となった. この結果は, 光強度を制御することで, 高い MC が得られる T_p を変えられることを示唆している. 当日は, parity-check task による非線形性の評価に加え, デモンストレーションとして人間の動作を推定する行動認識タスクの結果について報告する.

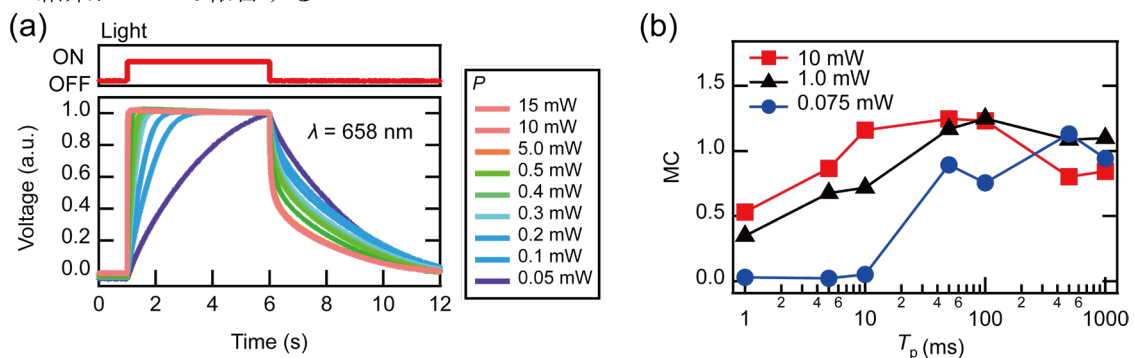


Fig.1 (a) Open circuit voltage dynamics induced by light pulse with various light intensity. (b) MC as a function of T_p with various light intensity ($T_p: 0.1 \text{ ms}$, $\Delta T: 0.1 \text{ ms}$).

【謝辞】本研究は JST 科学技術イノベーション創出に向けた大学フェローシップ創設事業 JPMJFS2144 及び, JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム JPMJSP2151 の支援を受けたものです.

[1] H. Komatsu et al. Adv. Electron. Mater. 10, 2300749(2024). [2] Z. Chen et al. Appl. Phys. Lett. 123, 10, 100501(2023). [3] G. Lee et al. IEEE Electron Device Lett. 45, 1, 108-111(2024). [4] H. Komatsu et al. AIP Advances. 14, 3, 035026(2024). [5] S. Nakade et al. J. Phys. Chem. B 108, 1628-1633(2004).

色素増感太陽電池を用いた可視光入力リザーバー素子： 多出力化による性能向上

Improving performance in visible-light input reservoir devices
using multiple-output dye-sensitized solar cells.

阪大院基礎工, ○中川 元真, 廣岡 正太郎, 山田 亮, 夢田 博一

Graduate School of Engineering Science, Osaka University

○M. Nakagawa, S. Hirooka, R. Yamada and H. Tada

E-mail : Nakagawa-t@molctrronics.jp

物理リザーバー (PR) コンピューティングは時系列データを高速に学習する方法で、エッジコンピューティングなどへの活用に向けた研究が活発に行われている¹。

我々は色素増感太陽電池 (DSC) が可視光を入力信号とする PR 素子として利用できることを報告した²。本研究では、異なる出力特性をもたせた DSC を並列に利用し多出力化することで、学習性能の向上をはかり、その要因を考察した。

Fig. 1 に測定回路を示す。信号源には白色の発光ダイオード (白色 LED) を利用した。同一組成の DSC を 2 つ重ね (上段を DSC1、下段を DSC2 とする)、光入力信号に対する応答を測定した。それぞれの DSC に取り付けた負荷抵抗 (それぞれ R_1 、 R_2) の両端に発生する電圧を出力 (V_1 、 V_2) とした。入射光の強度はフォトダイオード (PD) により確認した。

Fig. 2 にパルス光入力に対する単一の DSC 出力 (V_{out}) の負荷抵抗 (R) 依存性を示す。 R が大きくなるに従い、出力電圧が大きくなり、光照射終了後の減衰時間がより長くなった。実験は、 $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ 、 $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$ とし、減衰特性が異なる 2 つの信号を出力させた。

ランダムな二値のパルス列を利用する方法³により Memory Capacity を評価した。Fig. 3 に入力波形と予測波形の相関 ($C(D)$) の Delay (D) 依存性を示す。DSC1 単独のときと比べ、DSC2 を加えたときには、 $D > 2$ において $C(D)$ が増加しており、より応答速度が遅い DSC2 の成分 ($R_2 > R_1$) により、より長い短期記憶特性部分が改善していることが明らかになった。

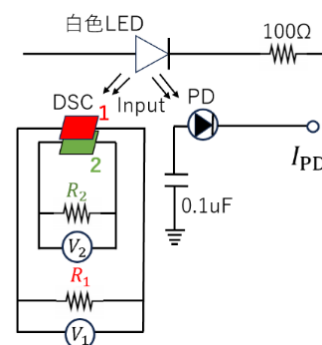


Fig. 1. Diagram of the experimental setup.

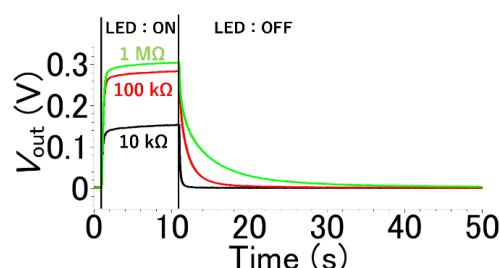


Fig. 2. Current transient of a single DSC for light pulse input: $R = 10 \text{ k}\Omega$, $100 \text{ k}\Omega$ and $1 \text{ M}\Omega$.

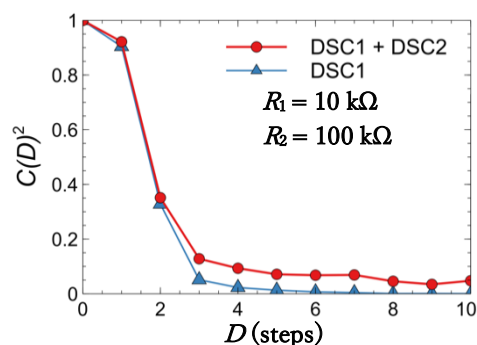


Fig. 3. Plot of $C(D)^2$ as a function of delay (D).

【参考文献】

- [1] “リザーバーコンピューティング：時系列パターン認識のための高速機械学習の理論とハードウェア” 田中剛平、中根了昌、廣瀬明、森北出版 (2021).
- [2] 中川他, 第 71 回応用物理学会春季学術講演会, 25a-31A-7 (2024).
- [3] S. Tsunegi et al, *Jpn. J. Appl. Phys.* **57** 120307 (2018).