

Oral presentation | FS Focused Session "AI Electronics" : FS.1 Focused Session "AI Electronics"

📅 Mon. Sep 16, 2024 1:30 PM - 6:00 PM JST | Mon. Sep 16, 2024 4:30 AM - 9:00 AM UTC 🏢 A33 (TOKI MESSE 3F)

[16p-A33-1~16] FS.1 Focused Session "AI Electronics"

Kentaro Kinoshita(Tokyo Univ. of Sci.), Takao Marukame(Hokkaido Univ.)

PR

secret place

1:30 PM - 2:00 PM JST | 4:30 AM - 5:00 AM UTC

[16p-A33-1]

[INVITED] Low-power IoT with neuromorphic technology

○Takeaki Yajima¹ (1.Kyushu Univ.)

2:00 PM - 2:15 PM JST | 5:00 AM - 5:15 AM UTC

[16p-A33-2]

Realtime handwriting anomaly detection using an FPGA-based spiking reservoir

○Hisashi Inoue¹, Hiroto Tamura², Ai Kitoh¹, Xiangyu Chen³, Zolboo Byambadorj³, Takeaki Yajima⁴, Yasushi Hotta⁵, Tetsuya Iizuka³, Gouhei Tanaka^{2,6}, Isao Inoue¹ (1.AIST, 2.Univ. Tokyo (IRCN), 3.Univ. Tokyo (Dept. Engineering), 4.Kyushu Univ., 5.Univ. Hyogo, 6.Nagoya Inst. Tech.)

2:15 PM - 2:30 PM JST | 5:15 AM - 5:30 AM UTC

[16p-A33-3]

Physical Reservoir Operation Utilizing Polarization Change in a Liquid Crystal

○Atsuhiko Mizuno¹, Tsuyoshi Hasegawa¹, Shusaku Nagano² (1.Waseda Univ., 2.Rikkyo Univ.)

◆ Highlighted Presentation

2:30 PM - 2:45 PM JST | 5:30 AM - 5:45 AM UTC

[16p-A33-4]

Research on object recognition and anomaly detection using Ag₂S reservoir

○Kaiki Yoshimura¹, Tsuyoshi Hasegawa¹ (1.Waseda Univ.)

2:45 PM - 3:00 PM JST | 5:45 AM - 6:00 AM UTC

[16p-A33-5]

Optical character recognition using three-dimensional silver sulfide physical reservoir

○Yuki Ohno¹, Tsuyoshi Hasegawa¹ (1.Waseda Univ.)

3:00 PM - 3:15 PM JST | 6:00 AM - 6:15 AM UTC

[16p-A33-6]

Classification of irradiated light patterns using a Cu-doped Ta₂O₅ reservoir

○Masaru Hayakawa¹, Tsuyoshi Hasegawa¹ (1.Waseda Univ.)

3:15 PM - 3:30 PM JST | 6:15 AM - 6:30 AM UTC

[16p-A33-7]

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

Kaito Kobayashi¹, Yuki Hayashi¹, Hiroshi Shimada¹, ○Yoshinao Mizugaki¹ (1.Univ. Electro-Comm.)

3:30 PM - 3:45 PM JST | 6:30 AM - 6:45 AM UTC

[16p-A33-8]

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

○(M2)Yuki Hayashi¹, Kaito Kobayashi¹, Hiroshi Shimada¹, Yoshinao Mizugaki¹ (1.The Univ. of Electro-Commun.)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

4:00 PM - 4:15 PM JST | 7:00 AM - 7:15 AM UTC

[16p-A33-9]

Quantification of Potential Relationship between Output Current Waveforms, Data Dimensionality, and Machine Learning Performance in Ionic Liquid-Based Physical Reservoir Device Demonstrated via PCA

○Yuki Kubo^{1,2}, Shunsuke Miyamoto³, Hisashi Shima², Toshiki Nokami³, Yasuhisa Naitoh², Hiroyuki Akinaga², Yumeng Zheng¹, Kentaro Kinoshita¹ (1.Tokyo Univ. of Sci., 2.AIST, 3.Tottori Univ.)

4:15 PM - 4:30 PM JST | 7:15 AM - 7:30 AM UTC

[16p-A33-10]

Origin of Information Processing Performance in Ionic Liquid-based Physical Reservoir Device Revealed by Three-Electrode Micro-Electrochemical Cell

○Yuki Kubo^{1,2}, Shunsuke Miyamoto³, Shima Hisashi², Toshiki Nokami³, Yasuhisa Naitoh², Hiroyuki Akinaga², Yumeng Zheng¹, Kentaro Kinoshita¹ (1.Tokyo Univ. of Sci., 2.AIST, 3.Tottori Univ.)

4:30 PM - 4:45 PM JST | 7:30 AM - 7:45 AM UTC

[16p-A33-11]

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

○Hisashi SHIMA¹, Yuki Kubo^{1,2}, Shunsuke Miyamoto³, Toshiki Nokami³, Yasuhisa Naitoh¹, Hiroyuki Akinaga¹, Zheng Yumeng², Kentaro Kinoshita² (1.AIST, 2.Tokyo Univ. of Sci., 3.Tottori Univ.)

4:45 PM - 5:00 PM JST | 7:45 AM - 8:00 AM UTC

[16p-A33-12]

Precise-prediction of Chaotic Time-series Data, Achieved with an in situ Manipulation of Chaotic Interfered Spin Waves

○Wataru Namiki¹, Daiki Nishioka¹, Yuki Nomura², Kazuo Yamamoto², Kazuya Terabe¹, Takashi Tsuchiya¹ (1.NIMS, 2.JFCC)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

5:00 PM - 5:15 PM JST | 8:00 AM - 8:15 AM UTC

[16p-A33-13]

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

○(B)Sota Hikasa^{1,2}, Wataru Namiki¹, Daiki Nishioka¹, Tohru Higuchi², Kazuya Terabe¹, Takashi Tsuchiya^{1,2} (1.NIMS, 2.Tokyo Univ. of Sci)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

5:15 PM - 5:30 PM JST | 8:15 AM - 8:30 AM UTC

[16p-A33-14]

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

○Daiki Nishioka¹, Hina Kitano^{1,2}, Wataru Namiki¹, Kazuya Terabe¹, Takashi Tsuchiya¹ (1.NIMS, 2.Tokyo Univ. Sci.)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

5:30 PM - 5:45 PM JST | 8:30 AM - 8:45 AM UTC

[16p-A33-15]

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

○(M2)Hina Kitano^{1,2}, Nishioka Daiki¹, Namiki Wataru¹, Kazuya Terabe¹, Takashi Tsuchiya¹ (1.NIMS, 2.Tokyo Univ. Sci.)

5:45 PM - 6:00 PM JST | 8:45 AM - 9:00 AM UTC

[16p-A33-16]

Recognition of hand-written digits using graphene/diamond reservoirs

Haruki Iwane¹, ○Kenji Ueda¹ (1.Waseda Univ.)

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。

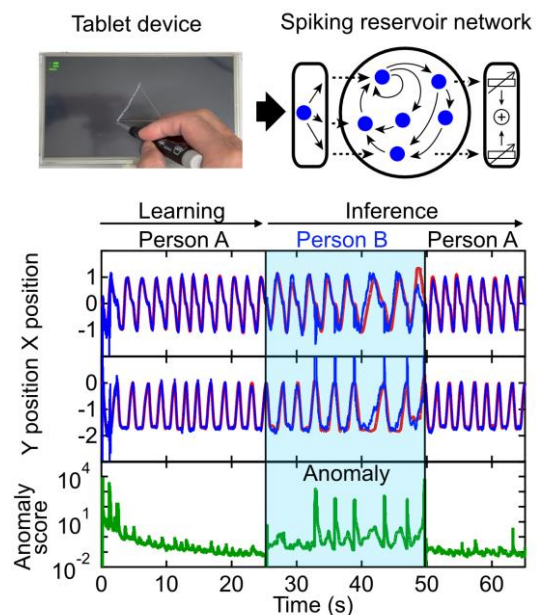


Figure: Handwriting anomaly detection using a spiking reservoir network and its detection result.

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。

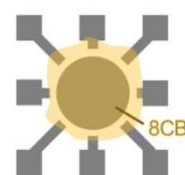


Fig.1 Used device.

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).

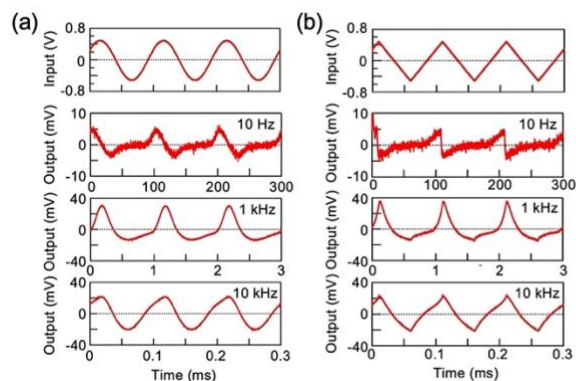


Fig.2 Frequency dependence of output with input of (a) sine wave and (b) triangular wave.

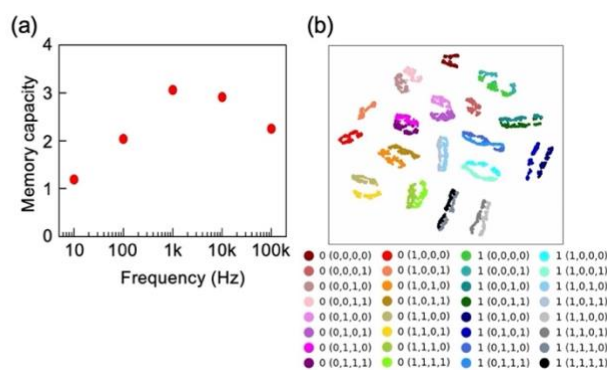


Fig.3 Result of STM task. (a) Memory capacity and (b) distribution of outputs analyzed by t-SNE.

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))。

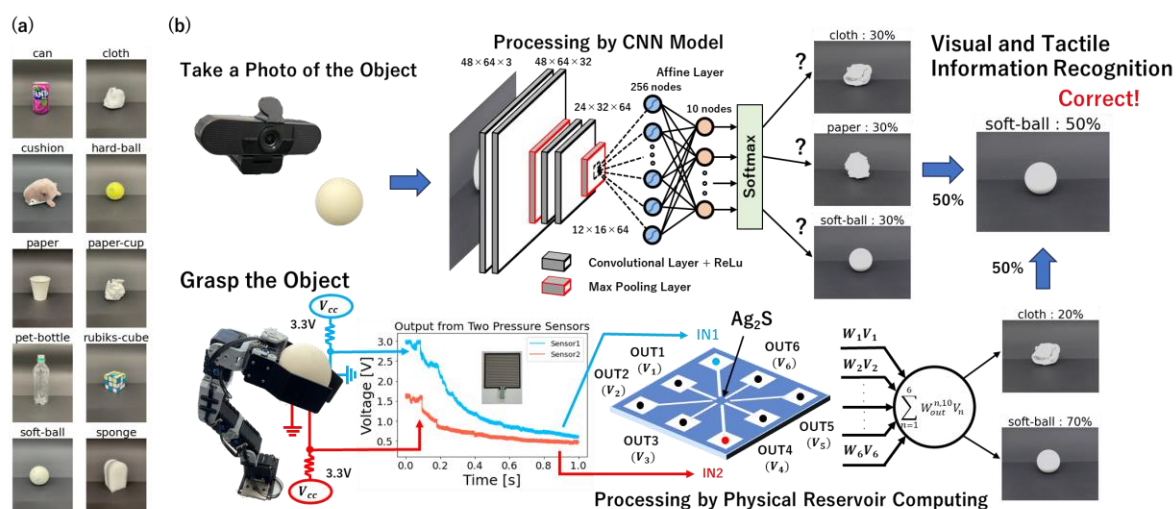


Fig. 1. (a) Objects used for the classification. (b) Experimental diagram of object recognition.

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。

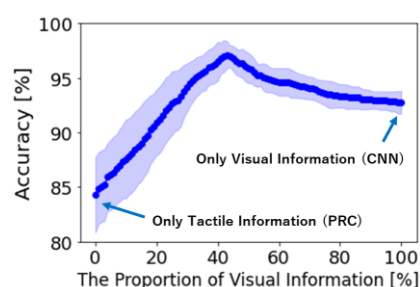


Fig. 2. Object Recognition Results

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

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).

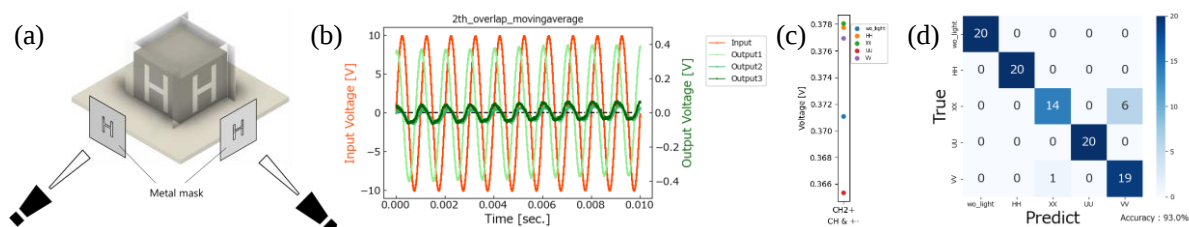


Fig. 1 (a) Schematic of an optical character recognition system with 3-dimensional Ag₂S reservoir. (b) Input and output waveforms when H-shaped optical characters are illuminated. (c) Average voltage measured with each pattern at one electrode. (d) A confusion matrix of the optical character recognition.

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。

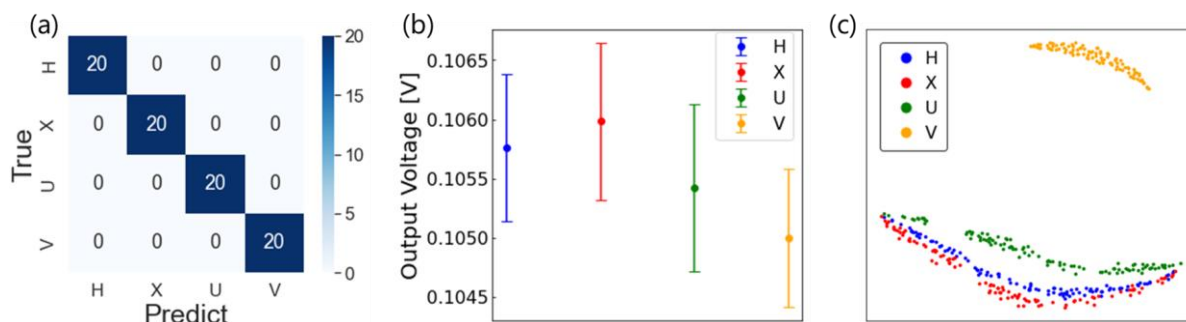


Fig. 1 Results of classification task of irradiated light patterns. (a) Confusion matrix of true label and output label. (b) Mean value and standard deviation of output from one electrode. (c) Clustering map by t-SNE analysis.

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]。

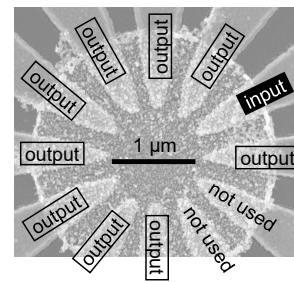


Fig. 1: SEM image of a fabricated random network of gold nanoparticles with 12 electrodes.

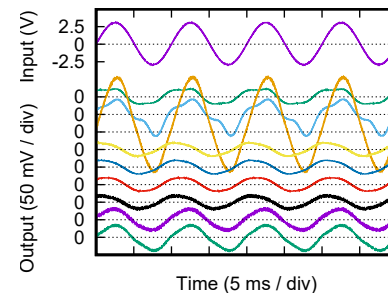


Fig. 2: Output waveforms for a 100Hz, 6 Vpp sinusoidal input voltage measured at 77 K.

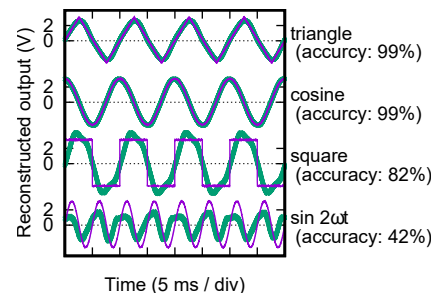


Fig. 3: Results of the waveform reconstruction tasks using an echo-state-network scheme.

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.

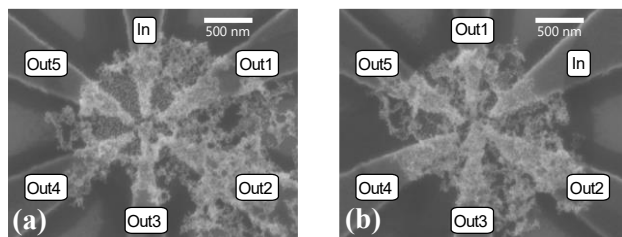


Fig. 1 SEM images of GNPs random arrays with 6 electrodes. (a) Reservoir1, (b) Reservoir2.

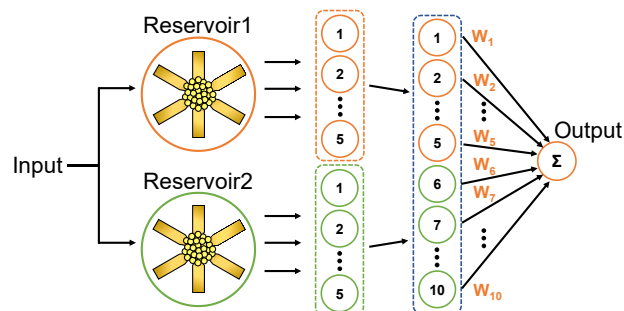


Fig. 2 Schematic diagram of two GNPs reservoirs in parallel configuration.

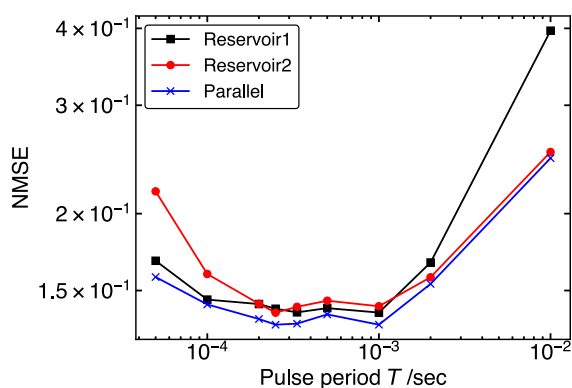


Fig. 3 NMSE values of the NARMA2 task for different reservoir configurations.

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 $\mathbf{I}_{\text{Raw}}$ 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 $\mathbf{I}_{\text{Raw}}$ 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 $\mathbf{I}_{\text{Raw}}$ 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 $\mathbf{I}_{\text{Raw}}$ 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.

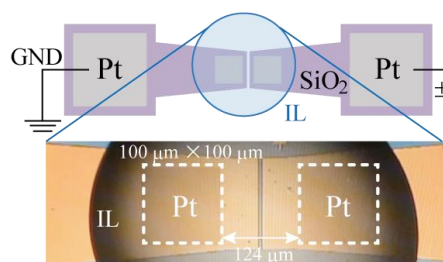


Fig. 1 Schematic view (upper) and micrograph (lower) of IL-PRD.

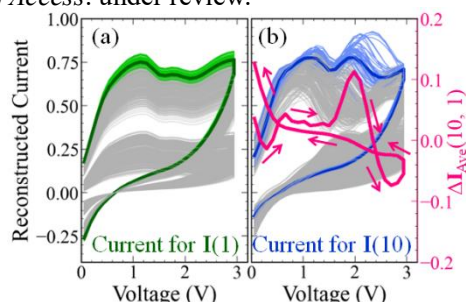


Fig. 2 Reconstructed current waveforms of (a) $\mathbf{I}(1)$ and (b) $\mathbf{I}(10)$ and $\Delta \mathbf{I}_{\text{Ave}}(10,1)$.

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).

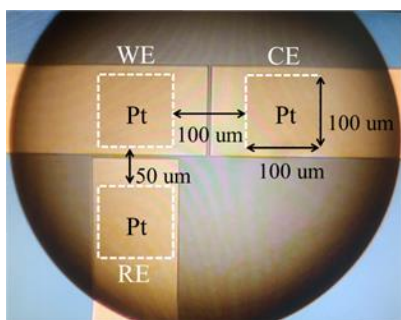


Fig. 1 Optical microscope image of 3 electrode micro-electrochemical cell.

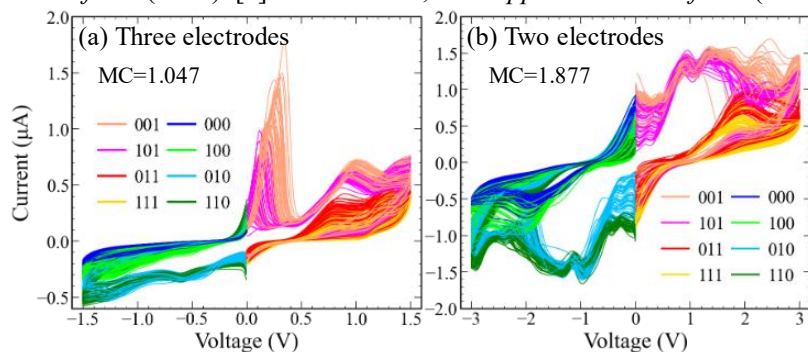


Fig. 2 Color-coded output current waveforms measured by applying random binary data stream in (a) 3E and (b) 2E configuration.

イオン液体物理リザーバード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ドバイス(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)

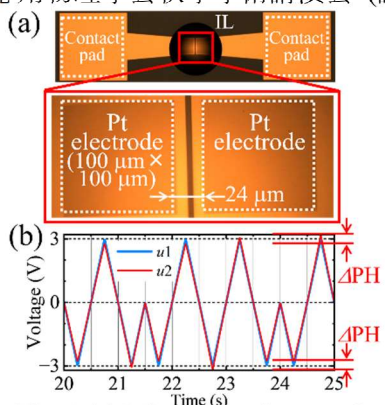


Fig. 1 (a) Microscopy image of IL-PRD and (b) example of input voltage signals u_1 and u_2 .

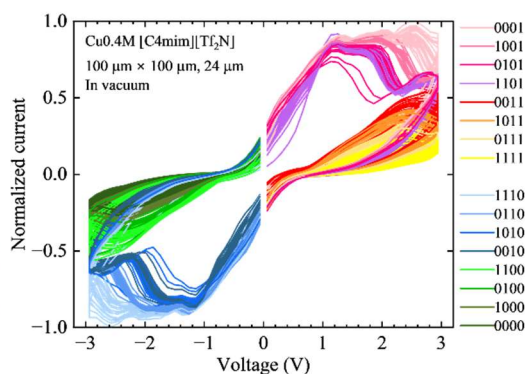


Fig. 2 Color-coded current-voltage curves measured in vacuum by applying the input signal u_1 to IL-PRD.

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.

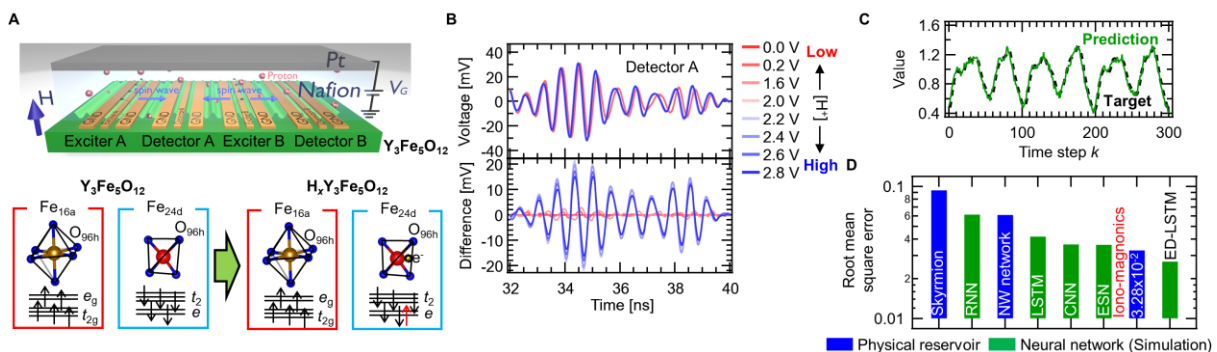


Figure (A) A schematic illustration of the physical device using a Y₃Fe₅O₁₂ and a Nafion electrolyte and spin configuration modulation in Y₃Fe₅O₁₂ due to an electron doping induced by proton insertion. (B) spin wave variation at various voltage applications. (C) A result of predicting a chaotic time-series 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。

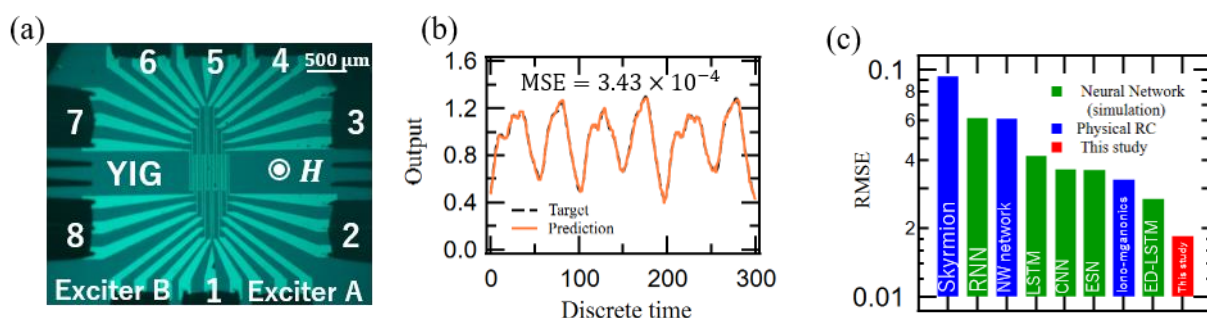


Fig. (a) multi-detection device based on $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (YIG) single crystal (H : the external magnetic field)
(b) Comparisons of target and output waveforms when external magnetic field is 180 mT and interval of the pulse is 10 ns (c) The benchmark of the prediction of Mackey-Glass 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 $5 \mu\text{s}$ 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).

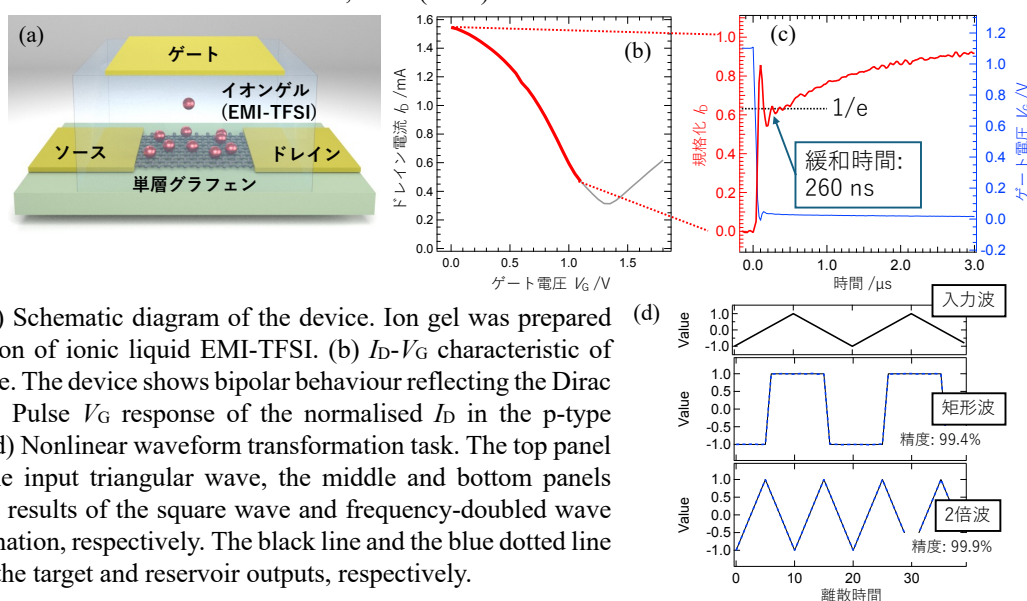


Fig. 1 (a) Schematic diagram of the device. Ion gel was prepared by gelation of ionic liquid EMI-TFSI. (b) I_D - V_G characteristic of the device. The device shows bipolar behaviour reflecting the Dirac cone. (c) Pulse V_G response of the normalised I_D in the p-type region. (d) Nonlinear waveform transformation 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 (LiCoO_2) 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 $+1.5\text{V}$ 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).

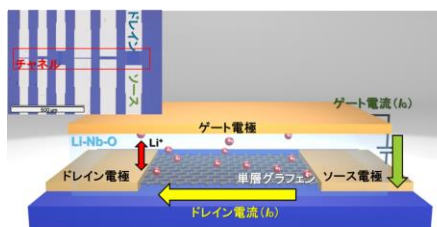


Fig. (a) Schematic image of an ion-gating reservoir

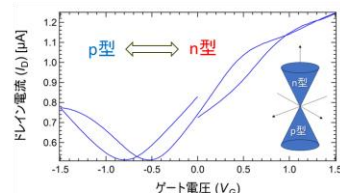


Fig. (b) The I_D - V_G characteristics

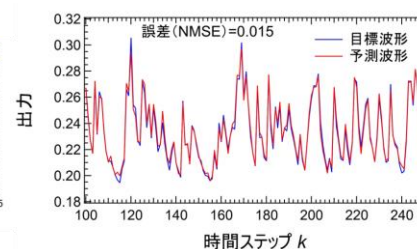


Fig. (c) The target and prediction waveforms for a second-order nonlinear equation task

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.

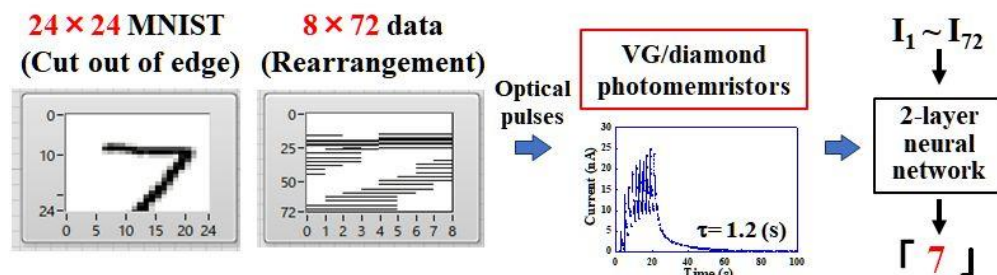


Fig. 1: Direct recognition of digits using VG/diamond photomemristors.