

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

■ 2025年9月10日(水) 13:30 ~ 16:15 | 会場 N106 (共通講義棟北)

[10p-N106-1~9] FS.1 フォーカストセッション「AIエレクトロニクス」

橋本 俊和(NTT)、大平 和哉(東芝)

第23回有機分子・バイオエレクトロニクス分科会 奨励賞受賞記念講演 1 件、リザーバーコンピューティング、物理リザーバー、センサAI融合、センサ内AI

13:30 ~ 14:00

[10p-N106-1] [第23回有機分子・バイオエレクトロニクス分科会 奨励賞受賞記念講演] モジュール構造型培養神経回路を用いたリザーバーコンピューティング

○住 拓磨¹、山本 英明^{1,2}、香取 勇一³、伊藤 亘輝²、守谷 哲²、金野 智浩⁴、佐藤 茂雄²、平野 愛弓^{1,2} (1.東北大AMIR、2.東北大通研、3.はこだて未来大、4.東北大薬)

◆ 奨励賞エントリー

14:00 ~ 14:15

[10p-N106-2] 圧電共振子型電流センサリザーバーによる電流情報解析

○西村 恵¹、藤村 紀文¹、吉村 武¹ (1.大阪公立大院工)

◆ 奨励賞エントリー

14:15 ~ 14:30

[10p-N106-3] 圧電振動子音響センサのリザーバー性能に対する機械的特性の影響

○(M2)高城 明佳¹、Aphayvong Sengsavang¹、藤林 世霸音¹、藤原 輝羅¹、村上 修一²、山根 秀勝²、藤村 紀文¹、吉村 武¹ (1.阪公大工、2.大阪技術研)

◆ 奨励賞エントリー

14:30 ~ 14:45

[10p-N106-4] 時間スケールを任意に制御可能な Pt/Nb:SrTiO₃型メモristaベースの 1M1C リザーバー回路

○(M2)村井 良輔¹、鄭 雨萌¹、木下 健太郎¹ (1.東理大先進工)

14:45 ~ 15:00

[10p-N106-5] 駆動系消費電力に基づく筋電義手人工力覚システムの検討

○飯田 結衣¹、葛西 誠也¹ (1.北大 量子集積センター・大学院情報科学)

15:15 ~ 15:30

[10p-N106-6] アメーバ型自律歩行ロボットにおける人工運動感覚に基づく路面状態識別と歩容切替の検討

○(M1)山口 彪斗^{1,2}、葛西 誠也^{1,2} (1.北大量集センター、2.北大院情報)

15:30 ~ 15:45

[10p-N106-7] 超次元コンピューティングに基づく高速・光触覚センシング

○(M2)Hong Jiseon¹、北川 慧¹、新山 友暁¹、桑原 大幸²、石田 隼斗²、平光 純²、間瀬 光人²、砂田 哲¹ (1.金沢大、2.浜松ホトニクス)

15:45 ~ 16:00

[10p-N106-8] スピントルク発振器の勾配降下法による最適化

○(P)今井 悠介¹、Liu Shuhong¹、明石 望洋²、中嶋 浩平¹ (1.東大情理、2.京大情報)

16:00 ~ 16:15

[10p-N106-9] 6502 CPUを用いたリザーバー計算

○窪田 智之¹、太田 駿¹、Qingyao Huang¹、Yongbo Zhang¹、中嶋 浩平¹ (1.東京大学)

モジュール構造型培養神経回路を用いたリザーバーコンピューティング

Physical Reservoir Computing with cultured modular neuronal network

東北大 AIMR¹, 東北大通研², はこだて未来大³, 東北大薬⁴

○住拓磨¹, 山本英明^{1,2}, 香取勇一³, 伊藤亘輝², 守谷哲², 金野智浩⁴, 佐藤茂雄², 平野愛弓^{1,2}

AIMR Tohoku Univ.¹, RIEC Tohoku Univ.², Future Univ. Hakodate³, GSPS Tohoku Univ.⁴

○Takuma Sumi¹, Hideaki Yamamoto², Yuichi Katori³, Koki Ito², Satoshi Moriya²,

Tomohiro Konno⁴, Shigeo Sato², Ayumi Hirano-Iwata^{1,2}

E-mail: takuma.sumi.c8@tohoku.ac.jp

神経細胞ネットワークが生み出す複雑なダイナミクスは、脳における情報処理の資源である^[1-3]。機械学習の分野では、複雑なダイナミクスを情報処理に結び付ける手法として、リザーバーコンピューティングが発展してきた^[4-6]。本研究では、ラット大脳皮質培養神経回路のダイナミクスをリザーバーとして利用し、計算モデルの構築と実験的評価を行った^[7]。特に、脳の配線構造を模倣したモジュール構造を培養神経回路に導入することで、入力情報の分類にモジュール性が寄与することを示した。さらに、音声信号を用いた課題では、女性話者のみを学習データに使用したにもかかわらず、男性話者の音声を識別できる汎化性能が明らかとなった。この汎化性能は、培養神経回路を介さず直接出力層を学習させた際には観察されなかったことから、生物の神経回路が情報の汎化に寄与する可能性が示唆される。発表では、これらの成果を基に著者らが現在取り組んでいる最新研究についても併せて報告する^[8]。

[1] D. V. Buonomano, W. Maass, State-dependent computations: Spatiotemporal processing in cortical networks. *Nat. Rev. Neurosci.* **10**, 113–125 (2009).

[2] S. Vyas, M. D. Golub, D. Sussillo, K. V. Shenoy, Computation through neural population dynamics. *Annu. Rev. Neurosci.* **43**, 249–275 (2020).

[3] M. M. Churchland et al., Neural population dynamics during reaching. *Nature* **487**, 51–56 (2012).

[4] H. Jaeger, The “Echo State” Approach to Analysing and Training Recurrent Neural Networks (German National Research Center for Information Technology, 2001).

[5] W. Maass, T. Natschläger, H. Markram, Real-time computing without stable states: A new framework for neural computation based on perturbations. *Neural Comput.* **14**, 2531–2560 (2002).

[6] Y. Sato, H. Yamamoto, Y. Ishikawa, T. Sumi, Y. Sono, S. Sato, Y. Katori, A. Hirano-Iwata, In silico modeling of reservoir-based predictive coding in biological neuronal networks on microelectrode arrays. *Jpn. J. Appl. Phys.* **63**, 108001 (2024).

[7] T. Sumi, H. Yamamoto, Y. Katori, K. Ito, S. Moriya, T. Konno, S. Sato, A. Hirano-Iwata, Biological neurons act as generalization filters in reservoir computing. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **120**, e2217008120 (2023).

[8] T. Sumi, A. M. Houben, H. Yamamoto, H. Kato, Y. Katori, J. Soriano, A. Hirano-Iwata, Modular architecture confers robustness to damage and facilitates recovery in spiking neural networks modeling in vitro neurons. *Front. Neurosci.* **19**, 1570783 (2025).

【謝辞】本研究は、科研費・学術変革領域研究(B)「脳神経マルチセルラバイオコンピューティング（略称：多細胞バイオ計算）」(JP21H05163, JP21H05164), 科研費 (JP18H03325, JP19H00846, JP20H02194, JP20K20550, JP21J21766, JP22H03657, JP22K19821, JP22KK0177), JST さきがけ (JPMJPR18MB), JSTCREST (JPMJCR19K3), 東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究の助成の下で行われた。

圧電共振子型電流センサリザーバーによる電流情報解析

Current Information Analysis Using Piezoelectric Resonator-Based Current Sensor Reservoir Computing

阪公大工, ○西村 恵, 藤村 紀文, 吉村 武

Osaka Metro. Univ., ○K. Nishimura, N. Fujimura, T. Yoshimura

E-mail: yoshimura@omu.ac.jp

【はじめに】IoT が急速に普及している一方で、センサから得られる膨大なデータの処理のための計算負荷や電力消費の増大が課題となっている[1]。その解決策として、非線形応答を示すセンサを利用したインセンサリザーバーコンピューティング(インセンサ RC)の研究が注目を集めている[2]。我々は圧電共振型電流センサによるインセンサRCを提案しており[3]、今回は、平行電線を通る交流電流の包絡線パターンの分類を実証した。このセンサの具体的な用途として着目しているのが、モータの劣化診断である。モータの電流波形には機器の状態に関する情報が含まれており、側帯波の振幅および周波数から回転子バーの劣化を診断する手法は電流徴候解析として知られている[4]。そこで今回は、モータに流れる電流を模擬した電流波形から側帯波の振幅の予測を試みた。

【実験と結果】圧電共振型電流センサは前回と同じものであり[5]、RC ベンチマークテストでは、 $C_{STM}=2.26$, $C_{PC}=2.24$ の情報処理能力を有している。Fig. 1 に用いた電流波形(a)と、その拡大波形(b)を示す。本研究では、50Hz, 1.2A_{p-p}の基本波に加えて3次, 5次, 7次の高調波を考慮したフーリエ級数モデルを用いて電流波形を作成した。側帯波の周波数を49.5Hzおよび50.5Hzとし、基本波の振幅に対する側帯波の振幅比 α を変化させた。500個のランダムビット列(0, 1)に対して、0の場合は $\alpha=0$ 、1の場合は $\alpha=0.25$ の側帯波を含む電流波形を平行電線に入力し、得られた出力電圧に対してリッジ回帰を用いて出力結合重みを計算した。テストデータとして、 $\alpha=0\sim 0.25$ の範囲を0.025刻みでランダムに変化させた電流波形パターンを100個用意し、訓練段階で得られた重みを用いて側帯波の振幅予測を実施した。Fig. 2 に訓練データに対する予測結果と、未知の側帯波振幅に対する予測結果を示す。未知の側帯波振幅予測における決定係数 R^2 は0.958であった。講演では側帯波の周波数予測についても議論する予定である。

【謝辞】本研究は岩谷科学技術研究助成および高橋産業経済研究財団の支援により実施された。

【参考文献】

- [1] A. Kankanhalli, et al., Gov. Inf. Q. 36, 304 (2019)
- [2] G. Dion, et al., Commun. Eng. 3, 48 (2024)
- [3] K. Nishimura et al., Jpn. J. Appl. Phys. 63, 09SP23 (2024)
- [4] 劉信芳ほか, 高田技報, Vol. 33, 21 (2023)
- [5] 西村ほか, 第72回春季応物, 16a-K306-11

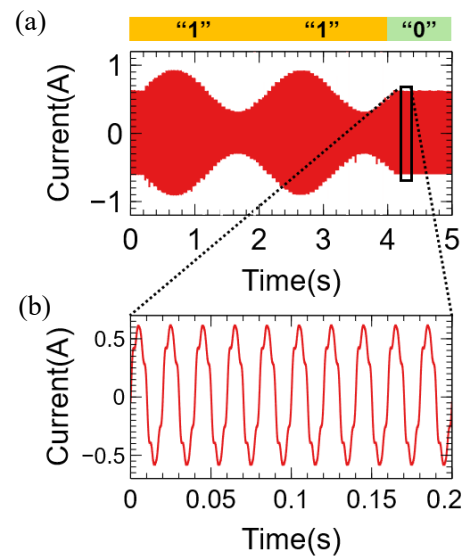


Fig. 1 (a) Current waveform,
(b) Zoomed-in waveform.

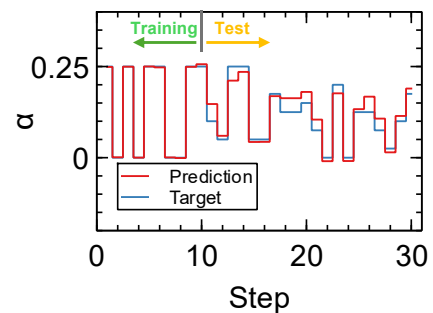


Fig. 2 Result of α prediction.

圧電振動子音響センサのリザー性能に対する機械的特性の影響

Effect of Mechanical properties on reservoir performance in a piezo oscillator acoustic sensor

阪公大工¹, 大阪技術研² °(M2)高城 明佳¹, Sengsavang Aphayvong¹, 藤林 世覇音¹,
藤原 輝羅¹, 村上 修一², 山根 秀勝², 藤村 紀文¹, 吉村 武¹

Osaka Metro. Univ.¹, ORIST.², °M. Takagi¹, S. Aphayvong¹, Y. Fujibayashi¹, K. Fujihara¹,
S. Murakami², H. Yamane², N. Fujimura¹, T. Yoshimura¹

E-mail: yoshimura@omu.ac.jp

【はじめに】エッジでの高度な情報処理が求められるようになり、インセンサリザーコンピューティングが注目を集めている[1]。音響センシングにおいては、共振周波数の異なる複数の振動子を並べたマイクアレイを用いて周波数領域での特徴抽出を行うことによって、計算機による FFT およびフィルタリングの過程を不要とし、消費電力および認識時間を大幅に改善したという報告がなされている[2]。そこで我々は微細化に適性をもつ圧電体薄膜 $\text{BiFe}_{(1-x)}\text{Mn}_x\text{O}_3$ (BFMO) を選択して、MEMS マイクアレイの作製と評価に取り組んでいる。本研究では、圧電振動子の機械的特性とリザー性能との関係を調べた。

【実験方法と結果】(100)SOI 基板上にエピタキシャル成長させた BFMO 薄膜を用いて、圧電 MEMS マイクアレイを作製した [3]。振動子は片持ち梁構造であり、先端の錘の重量や梁の長さによって共振周波数を調整している(Fig.1)。最初にスピーカーを用いて、周波数を掃引しながら音波を振動子に入力した。これにより得られた周波数特性(Fig.1)から共進周波数および半値幅を測定して、機械的品質係数 Q_m 値およびピーク感度を算出した。 Q_m は共振ピークの鋭さを表し、この値が大きいほど共進周波数での感度が高くなる一方で周波数帯域幅は減少する。一般的なコンデンサマイクの感度は約 0.01V/Pa であるのに対し、Fig.1 に示した振動子は約 0.025V/Pa と、2 倍以上の感度を示した。マイクアレイの中から Q_m 値とピーク感度がそれぞれ(a) Q_m :426 感度: 0.025V/Pa (b) Q_m :328 感度 0.004V/Pa (c) Q_m :288 感度:0.007V/Pa である 3 つの振動子を選び、NARMA-2 タスクを用いて物理リザー計算の性能評価を行った。規格化平均二乗誤差(NMSE)はそれぞれ(a)0.09 (b)0.04 (c)0.06 であったことから、 Q_m 値の大小と NMSE に相関は見られないことがわかった。講演ではステップサイズ等のパラメータを最適化し、圧電振動子の機械的特性がリザー性能に影響するかを議論する。

【謝辞】本研究は、科研費・基盤 B(25K01290) の支援を受けて行われた。

【参考文献】

- [1] N. Lin et al, APL Mach. Learn. (2024)
- [2] H. Liu et al, J. Micromech. Microeng. (2023)
- [3] 高城ほか、第 72 回春季応物、15p-K503-15

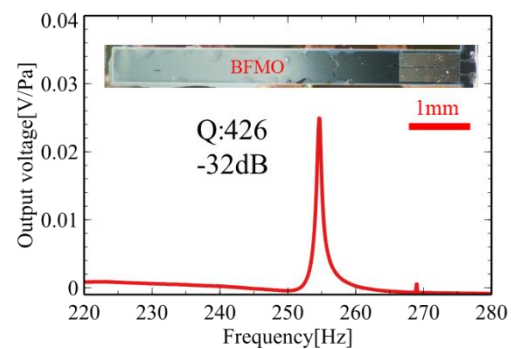


Fig.1 MEMS cantilever and resonance curve

時間スケールを任意に制御可能な

Pt/Nb:SrTiO₃ 型メモristベースの 1M1C リザーバー回路1M1C Reservoir Circuit Based on Pt/Nb:SrTiO₃ Memristor with Regulatable Time Scale東理大先進工[○](M2) 村井 良輔, 鄭 雨萌, 木下 健太郎Tokyo Univ. of Sci., [○](M2) Ryosuke Murai, Yumeng Zheng, Kentaro Kinoshita

E-mail: 8424539@ed.tus.ac.jp

【序論】高速かつ省エネルギーな時系列データ処理を可能にする技術として物理リザーバーコンピューティング (PRC) が有望である[1]. しかし, PRC において学習性能が発揮される入力信号の時間スケールは, リザーバー層に用いる物理ダイナミクスの過渡応答の時定数程度に制限されるという課題がある[2]. 従って, 物理ダイナミクスの時定数を簡便な手法で制御可能な PRC の設計が求められる. 本研究では, 入力信号の振幅により抵抗状態を制御可能な Pt/Nb:SrTiO₃ 型メモristとコンデンサで構成される 1M1C リザーバー回路を提案し, その学習性能を評価した. この結果から, 単純かつ単一の回路を用いて, 簡便な手法で時間スケールの制御が可能であることを示した.

【実験方法】0.5wt% Nb ドープ SrTiO₃ (NSTO) 単結晶基板上に Pt 電極をスパッタし, Pt/NSTO 型メモrist素子を作製した. メモrist素子とコンデンサ ($C=0.1 \mu\text{F}$) を用いて, Fig. 1 のように 1M1C リザーバー回路を構成した. "0", "1" にそれぞれ特定の電圧が対応する 2 値のランダムなパルス列を入力し, 出力電圧に対して短期記憶特性 (STM) タスクおよびパリティチェック (PC) タ

スクを用いて Memory capacity (MC) および Parity check capacity (PC) を評価した.

【結果及び考察】メモristの初期状態を低抵抗状態 (LRS) および高抵抗状態 (HRS) に設定した場合における MC および PC のパルス幅依存性を Fig. 2 に示す. 両タスクにおいて, LRS の場合, HRS に比べてパルス幅が小さい領域で MC および PC が共に高くなった. またメモristの初期状態を HRS に設定した上で, 入力信号の振幅を 1.2, 2, 3 V とした場合における MC および PC のパルス幅依存性を Fig. 3 に示す. 両タスクにおいて, 振幅が大きいほどパルス幅が小さい領域で MC および PC が共に高くなった. いずれの手法においてもメモristの抵抗状態 R_m の可変性により系全体の時定数 $\tau=R_m C$ を調整可能であり, 単一の回路上で簡便に時間スケールを制御できることが示された. 当日は, Pt/NSTO が持つ抵抗緩和特性と学習性能の関係についても議論を行う予定である.

【参考文献】 [1] G. Tanaka *et al.*, *Neural Networks* **115**, 100 (2019). [2] Y. Yamazaki, K. Kinoshita, *Appl. Phys. Express* **17**, 027001 (2024).

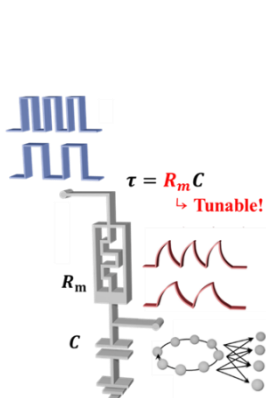


Fig.1 Structure of the 1M1C PRC system.

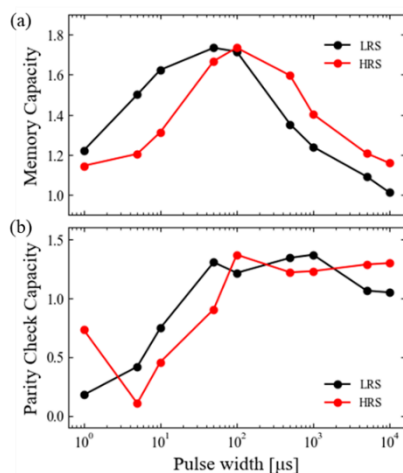


Fig.2 Pulse width dependence of (a) MC value (b) PC value when the memristor is set to LRS or

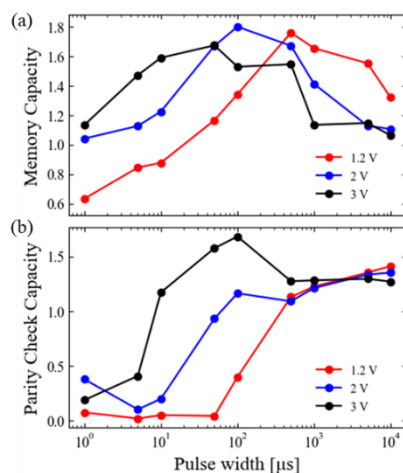


Fig.3 Pulse width dependence of (a) MC value (b) PC value when pulse amplitude is varied.

駆動系消費電力に基づく筋電義手人工力覚システムの検討

Study on Artificial Force Sensing for Myoelectric Prosthetic Hand Based on Power Consumption of Servo Motor Drive System

北大 量子集積センター・大学院情報科学 ○飯田結衣, 葛西誠也

RCIQE and IST, Hokkaido Univ., °Y. Iida, S. Kasai

E-mail: iida.yui.u6.elms.hokudai.ac.jp

はじめに：筋電義手は上肢を失った人々の生活を支援する装置として発展が望まれている。課題として体性感覚を伝達する深部感覚を再現する機構の欠如がある[1]。使用者は義手の動作や状態を把握するには視覚に頼らざるを得ず自然な操作感が得られない。近年ではセンサを利用した感覚提示が広く研究されているが、外力や時間変化がなければ検知できず、身体感覚につながらない。そこで本研究では、把持力の調節や重さの知覚に関わる力覚に着目し、駆動系消費電力計測と機械学習解析によるコンパクトな人工感覚システムの実現を目的として検討を行った。

コンセプト：人体における力覚は外力や動作に依らず力を感知できることから[2]、同様に静的な力も検出可能な方法として、トルクに比例して変化するモータの消費電力を測定し解析する。筋電義手は複数の関節を有し各々駆動用のサーボモータが備わっている。手の動き方により各サーボモータの消費電力の時系列が変化するため、機械学習を利用し義手にかかる力を推論する。筋電義手への搭載を考慮し低消費電力でリアルタイム推論に適したリザバー計算を用いた。

実験方法と結果：Fig. 1 のように 3 つのサーボモータによって動作するロボットハンドの掌部に負荷（分銅）をぶら下げ、上下 2 通りの動作を行い各サーボの消費電力時系列を取得した。外部 PC に実装したエコーステートネットワーク (ESN) 型リザバー計算系に消費電力時系列を入力し、分銅の重さを教師データとして重みづけ学習を行い、推論テストによって生成モデルの精度を評価した。結果を Fig. 2 に示す。学習データに対する正答率は 90 % 以上であったが、学習後のテストデータに対する正答率は 0 ~ 28 % にとどまった。汎化性能が低く改善が必要であるが、提案手法による人工力覚機能の実現の可能性が得られた。

謝辞：本研究の一部は地方大学・地域産業創生交付金事業の支援を受けて行われた。

[1] 横井ら, 精密工学会春季大会 2009 年 3 月中央大学.

[2] 金子ら, バイオメカニズム学会誌 35 巻, 3 号 (2011) 186-190.

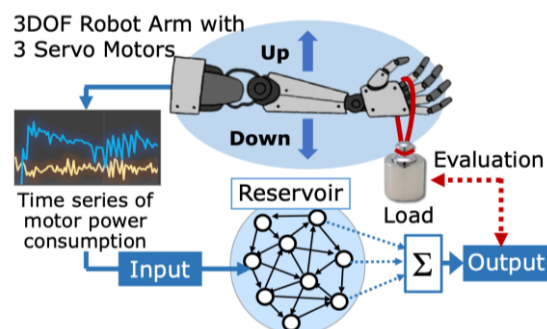


Fig. 1 Experimental setup for inferring load weight from time series of motor power consumption.

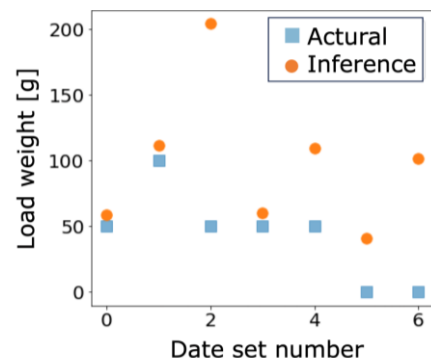


Fig. 2 Result of inference of load weight (test data).

アメーバ型自律歩行ロボットにおける人工運動感覚に基づく 路面状態識別と歩容切替の検討

Study on Artificial Kinesthetic Sensory for Ground Condition Perception and Gait Switching in An Amoeba-inspired Four-legged Autonomous Walking Robot

北海道大学 量集センター・情報科学院, °山口 彪斗、葛西 誠也

RCIQE and Graduate School of IST, Hokkaido Univ., °H. Yamaguchi, S. Kasai

E-mail: yamaguchi.hyoto.b5@elms.hokudai.ac.jp

はじめに：我々はこれまでに高度な計算能力を持つ生物粘菌に着想を得た最適化計算システムをロボットの自律制御に応用し、障害物を乗り越える歩容を探索する「アメーバ型自律歩行ロボット」を開発した[1]。しかし、一步ごとに歩容探索するため歩行効率が悪い。そこで、ロボットに路面状態を識別する能力を付与し、路面状態に応じた適切な歩行様式を選択する能力を実装したい。本研究では、既存センサを最大限利用して環境の情報を取得する方向性とし、視覚情報に頼らない運動感覚の人工的実装とそれを用いた路面状態識別による歩容切替を検討した。

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、対角脚を交互に踏出す標準的な歩行パターンで平坦および凹凸路面 (Fig. 1) を歩行させ、3軸方向の加速度時系列を取得した。この時系列データに基づきリザーバー計算 (RC) を用い路面識別を試みた。RC モデルの構築は外部 PC で行い、25 Hz で記録された加速度時系列を入力、歩行路面を教師データ、路面予測を出力として予測精度が最大になるようにハイパーパラメータ調節を行い学習させた。構築したモデルは 8 bit 量子化したのちロボット制御用のマイコンに移植した。平坦と凹凸路面を組合せた4種類の路面を歩行させ識別を行った結果、RC が路面に応じ異なる出力をすることを確認した (Fig. 2)。しかしながら、平坦路面と凹凸路面が切り替わる場合において識別精度が顕著に低下した。ロボット行動の観測から、ロボットの一步の間隔が凹凸の間隔と近いことが原因であると推測される。身体的特徴と環境の関係性により取得可能な情報量が変化することから、歩幅にゆらぎを付加することで識別精度が改善すると考えられる。

本研究の一部は地方大学・地域産業創生交付金事業の支援を受けて行われた。

[1] K. Saito *et al.*, Proc. IEEE ISMVL2018, Linz, Austria, May 16-18, 2018, pp.127-131.

[2] G. Tanaka *et al.*, Neural Networks **115**, pp.100-123 (2019).

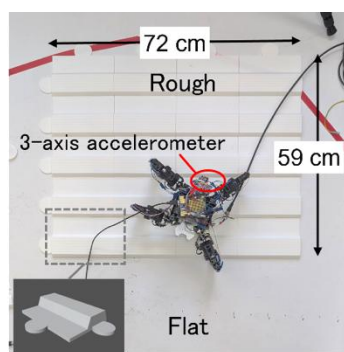


Fig. 1 Experimental setup.

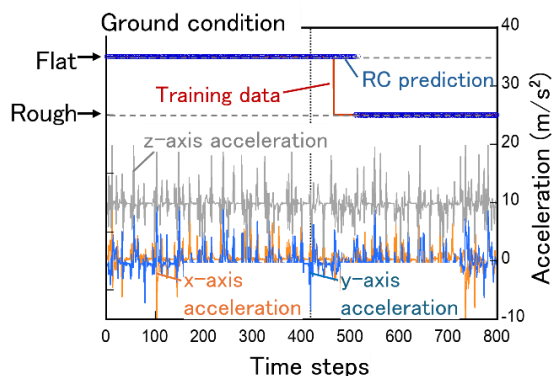


Fig. 2 Result of ground discrimination by RC.

超次元コンピューティングに基づく高速・光触覚センシング

High-speed optical tactile sensing based on hyperdimensional computing

金沢大¹, 浜松ホトニクス株式会社², [○](M2)Hong Jiseon¹, 北川 慧, 新山 友暁¹,

桑原 大幸², 石田 隼斗², 平光 純², 間瀬 光人², 砂田 哲¹

Kanazawa Univ.¹, Hamamatsu Photonics², Jiseon Hong¹, Kei Kitagawa, Tomoaki Niiyama¹,

Hiroyuki Kuwabara², Hayato Ishida², Jun Hiramitsu², Mitsuhiro Mase², Satoshi Sunada¹

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

ロボット等における触覚センシングは、対象物体の状態や環境との相互作用を高精度に把握するために重要である。近年、ソフトマテリアルを用いた柔軟な触覚センサーが注目されているが、その中で有望なアプローチの1つとして光を用いた触覚センシング手法がある。光触覚センシング手法は広範囲な接触情報をイメージデータとして取得でき、光干渉計測手法と合わせれば接触に関する多様かつ詳細な情報も高感度に同定できるという特徴がある[1]。一方で、従来手法ではイメージセンサーを用いて接触情報を含む画像データを取得していたため、膨大な情報を処理しなければならず後段処理に大きな負荷が生じ、初期接触や把持物体の落下等の急激な変化の検出を困難にしていた。本研究では、急激な接触・圧力変化にもリアルタイムに応答可能な光触覚センサー及び Hyperdimensional Computing (HDC)を用いた情報処理手法を提案する。本提案の触覚センサー(Fig. 1)はセンサー内部の光散乱パターンを光検出器アレイで取得する構造であり、原理的には $10\mu\text{s}$ 以下の応答時間で接触情報を検出できる。一方、HDC は入力情報を 1000 個以上の要素を持つベクトル(Hypervector: HV)として分散的に表現することで、基本的な算術演算のみで高度な処理を可能とする計算手法である[2,3]。また、HDC では少数の学習データでオンライン学習が可能であるという特徴も有する。本研究では、Fig. 1 に示す触覚センサーと HDC を用いた処理方法(Fig. 2)を組み合わせることで、高速反応およびモーション感知が可能であることを検証する。

Fig.1

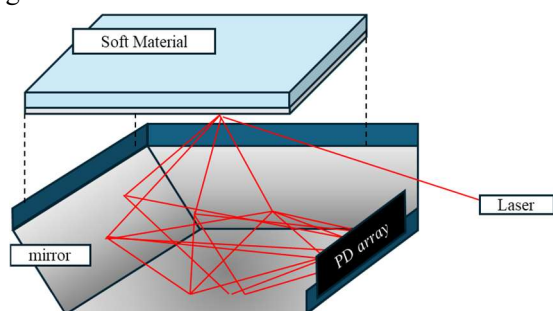


Fig.1 PD アレイを用いたセンシング構造

Fig.2

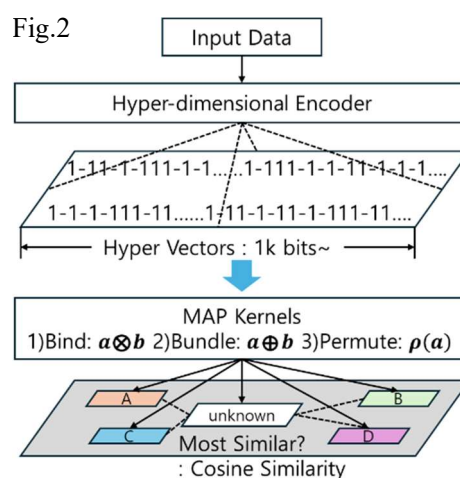


Fig.2 HDC を用いた学習及び分類

[1] S. Shimadera *et al.* Sci. Rep. **12**, 13096 (2022). [2] P. Kanerva, Cognitive Computation, **1**, 139–159 (2009).

[3] L. Ge and K. K. Parhi, IEEE Circ. Syst. Mag. **20**, 30–47 (2020).

スピントルク発振器の勾配降下法による最適化

Gradient-based optimization of spin-torque oscillator

東大情理¹, 京大情報² 今井悠介¹, Shuhong Liu¹, 明石望洋², 中嶋浩平¹Univ. Tokyo¹, Kyoto Univ.², Yusuke Imai¹, Shuhong Liu¹, Nozomi Akashi², Kohei Nakajima¹

E-mail: imai@isi.imi.i.u-tokyo.ac.jp

スピントルク発振器は、ナノスケールにおいて高効率に動作する非線形発振素子として、レザ
バーコンピューティング[1]や画像認識[2]などへの応用が注目されている。その挙動はランダウ＝
リフシッツ＝ギルバート（LLG）方程式により記述され、同方程式には外部磁場、電流、ダンピ
ング定数など複数のパラメータが含まれる。これまで、これらのパラメータは主にグリッドサー
チにより最適化されてきた。

本発表では、スピントルク発振器を記述するランダウ・リフ
シッツ・ギルバート方程式に adjoint method[3]を適用することで
勾配降下法を用いて方程式のパラメータの最適値を求める[4,
5]。まず初めに、シミュレーションによって作られたダイナミ
クスを教師データとして、そのシミュレーションで用いられた
パラメータ（外部磁場、電流、ダンピング定数）の値を推定す
るタスクを解いた。その結果、1パラメータ推定が高精度で行
えるという結果が得られた（Fig. 1）。2パラメータ推定につい
ても学習率の設定を適切に調節することによって高い精度が
得られた。次に、画像認識タスク（MNIST および CIFAR-10）
において、入力層、スピントルク発振器の結合系のパラメータ
（外部磁場、電流、ダンピング）、出力層のチューニングを行
った。その結果、スピントルク発振器のパラメータのチュー
ニングを行うことによってより高い精度が得られるという結果
が得られた（Fig. 2）。

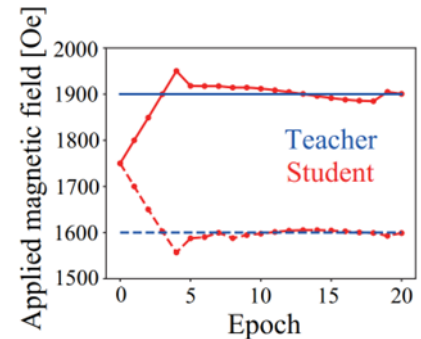


Fig. 1 Parameter prediction for applied magnetic field.

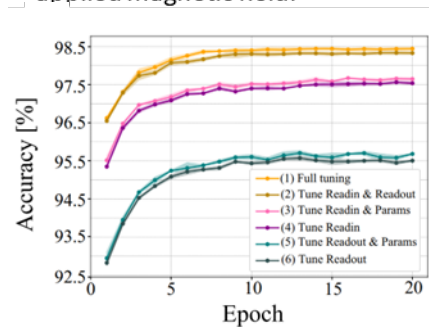


Fig. 2 Accuracies of MNIST task.

[1] Marrows, Christopher H., et al. "Neuromorphic computing with spintronics." *npj Spintronics* 2.1 (2024): 12.

[2] Liu, Shuhong, et al. "Exploiting Chaotic Dynamics as Deep Neural Networks." *arXiv preprint arXiv:2406.02580* (2024).

[3] Chen, Ricky TQ, et al. "Neural ordinary differential equations." *Advances in neural information processing systems* 31 (2018).

[4] Imai, Yusuke, et al. "Gradient-based optimization of spintronic devices." *Applied Physics Letters* 126.8 (2025).

6502 CPU を用いたリザーバー計算

Reservoir Computing with 6502 CPU

東大情理¹, ○(P) 窪田 智之¹, 太田 駿¹, Yongbo Zhang¹, Qingyao Huang¹, 中嶋 浩平¹

The Univ. of Tokyo¹, ○(P) Tomoyuki Kubota¹, Shun Ota¹, Yongbo Zhang¹, Qingyao Huang¹,

Kohei Nakajima¹ E-mail: kubota@isi.imi.i.u-tokyo.ac.jp

近年、物理リザーバー計算 (physical reservoir computing, PRC) と呼ばれる計算フレームワークが注目を集めている [1]. PRC は物理系の多様な応答を用いて情報処理装置を構築する枠組みである. 同枠組みでは、系に対して入力を与え、系の状態を線形回帰することで出力を構成する. こうした実装の容易さから、PRC は、量子、光、スピントロニクス、有機材料、ソフトロボットの様々な物理系に適用されている.

一方で、中央演算処理装置 (CPU) はコンピュータの主要な構成要素であり、所望の入出力関係に基づいて正確に出力を生成するように設計された物理系である. CPU は多数のトランジスタによって駆動されており、例えば古典的な CPU である MOS 6502 は、3,510 個のトランジスタによって構成される. このような多数の

トランジスタはプログラム実行の過程で並列に動作するため、出力を生成する過程の計算結果や、出力とは無関係の計算結果が CPU 内では生じる.

本発表では、物理リザーバー計算の枠組みを MOS 6502 のシミュレータ [2] に適用することで、CPU の物理リザーバーとしての計算能力を調査した結果を報告する. 本発表では初めに、MOS 6502 を構成する 3,510 個のトランジスタの情報処理容量 [3] を調べることで、CPU が余剰な計算能力を有することを示す. さらに、この余剰な計算能力を活用することで、CPU が、プログラムされたタスク以外のタスクを解けることを示す. これらの解析を通して、従来の使用方法以上に CPU から計算能力を引き出せる可能性を提示する.

参考文献

- [1] Kohei Nakajima and Ingo Fischer. Reservoir computing. *Springer*, 1(5):8, 2021.
- [2] Greg James, Barry Silverman, and Brian Silverman. Visualizing a classic cpu in action: the 6502. In *ACM SIGGRAPH 2010 Talks*, pages 1–1. 2010.
- [3] Joni Dambre, David Verstraeten, Benjamin Schrauwen, and Serge Massar. Information processing capacity of dynamical systems. *Scientific reports*, 2:514, 2012.

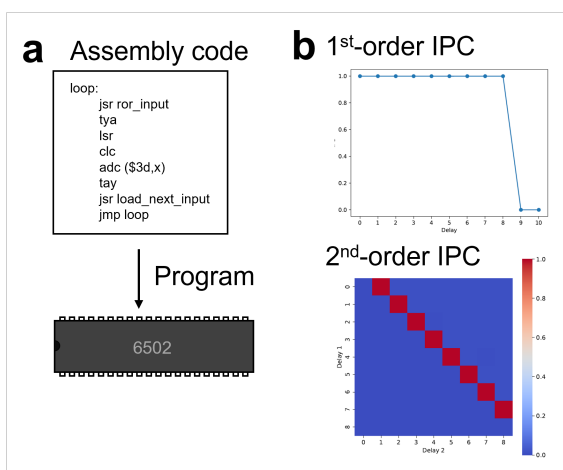


図1 (a) CPU リザーバーの構成. アセンブリ言語でプログラムを書き込む. プログラムでは、毎ループ ROM から入力を読み込む. (b) 3,510 トランジスタの情報処理容量 (IPC).