

物理リザバーを内包した周波数変調型加速度センサによる知能化 IoT 端末

研究代表者 土屋 智由 京都大学大学院工学研究科マイクロエンジニアリング専攻・教授

1 背景と研究の目的

モノのインターネット (IoT) 技術において微小電気機械システム (MEMS) は小型、安価、低消費電力で高性能なセンシングデバイスとして必要不可欠である。現在は MEMS センサから得られた物理量、化学量などをそのままワイヤレス送信し、クラウド処理している。しかしながらこの方式は送信データ量が莫大でありワイヤレスでの大量のデータ送信に必要な電力供給の問題が生じる。これに対して、センサノードで信号処理を行い、必要最小限の情報を送信するいわゆるエッジコンピューティングが期待される(図 1)。しかし、センサノード上での高速な信号処理は消費電力、サイズの増大が課題となる。そこで近年改めて注目されているのがニューラルネットワーク(NN)を用いた機械学習による信号処理であり、特に NN を物理現象で実現する物理リザバーコンピューティング(RC)が注目されている。RC においては再帰的 NN を物理現象で構成し(リザバー)、NN の各ノードの値に重みづけして出力する出力層のみで学習を行う方法であり、時系列データを比較的簡単な学習で処理できることで、また、物理現象で NN を構成するため低消費電力化、小型化が可能と期待されている。

本提案ではこれを一步進めてセンサノード内での物理 RC を用いた信号処理において、従来のセンサ用 MEMS 構造にリザバーとなる構造を付加し、一次信号処理をチップ上で可能とし、コスト、消費電力、サイズなどの点で他の手法に対して優位となる物理リザバーをセンサ構造と同じ MEMS で製作するデバイスを提案する。本研究では、非線形振動子からなるリザバーを加速度センサと一体化し、特徴ある振動入力に対する応答が構造レベルで可能な知能化加速度センサの実現を検討した。また、将来の展開を見据えて、加速度センサと同じ慣性センサで回転角速度を検出する振動ジャイロについての研究として (100) シリコンで作製するモードマッチシリコンリングジャイロを開発した。さらに、新たな物理リザバーとして表面弾性波デバイスを物理リザバーとして用いた機械学習についての検討も行った。

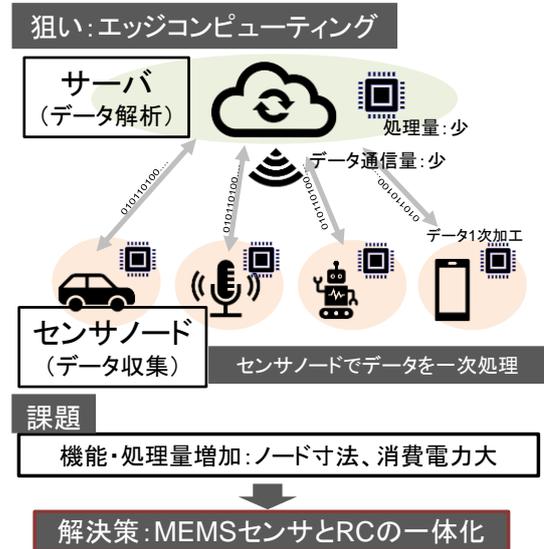


図 1 研究の背景と目的

2 研究内容

2-1 周波数変調型加速度センサデバイスの設計

本研究では図 2 に示すような Comi らが提案した周波数変調型加速度センサを加速度センサ一体化物理リザバーとして利用する。このデバイスは中央のマス (質量) から上下に接続され、図面の左右方向に延伸する梁 (支持梁) で支持されおり、図面の上下方向の加速度により慣性力を受け変位する。慣性力は支持梁においてこの原理で拡大されマスの左右に図面上下方向に延伸する梁 (リザバー振動子) に張力を与える。加速度センサとしての動作はリザバー振動子の共振周波数変化を検出することで実現されているが、ここでは両端支持梁であるリザバー振動子の非線形振動に着目してこれを物理リザバーの実ノードとして用いる。

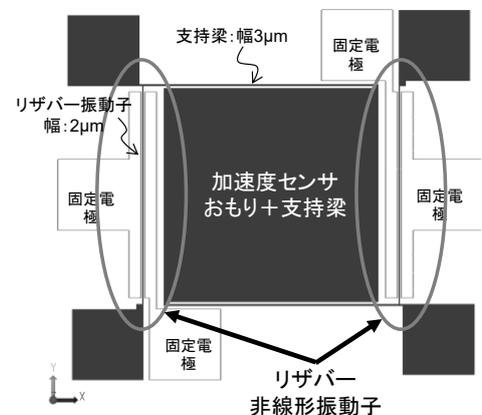


図 2 非線形振動子一体化加速度センサ

2-2 デバイスの試作

設計したデバイスを Silicon on Insulator ウェハを用い、京都大学ナノテクノロジーハブ拠点の半導体微細加工設備を用いて試作した。活性層厚みが 15 μm の SOI ウェハを用いて、フォトリソグラフィと深掘ドライエッチングを用いて構造体を形成し、フッ酸蒸気を用いた気相エッチングで SiO_2 犠牲層を除去して構造をリリースして製作した。試作したデバイスの写真を図 3 に示す。

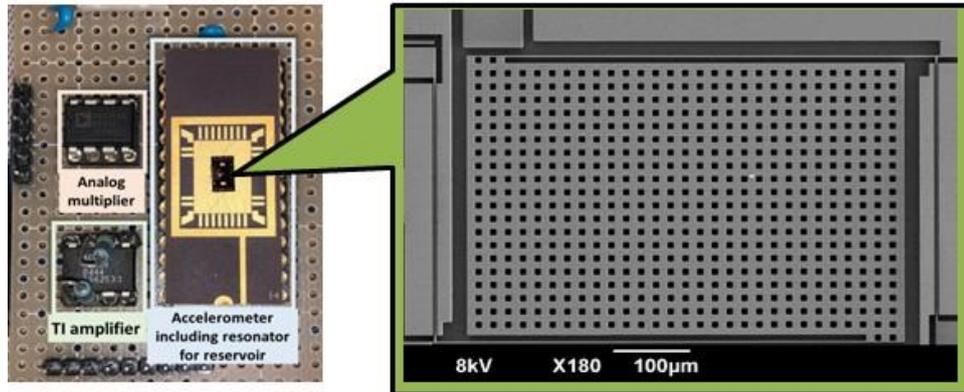


図 3 試作した周波数変調型加速度センサ

2-3 デバイスの評価と最適動作条件の検討^{2), 3)}

まず、加速度センサとしておよび非線形振動子としての評価を行った。図 4 は加速度を印加した時の周波数特性を示す。加速度印加によっておもりが変位し、リザーバ振動子に加わる張力が変化することで共振周波数がシフトしている。また、大振幅時の非線形振動特性を測定した。結果を図 5 に示す、こちらは振幅を大きくするとリザーバ振動子の張力が増加し、たわみ剛性が増加、共振周波数が上昇する硬化ばね特性を示している。

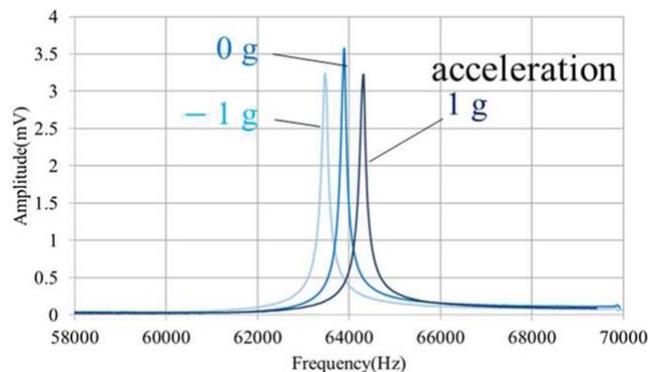


図 4 加速度印加による周波数特性変化

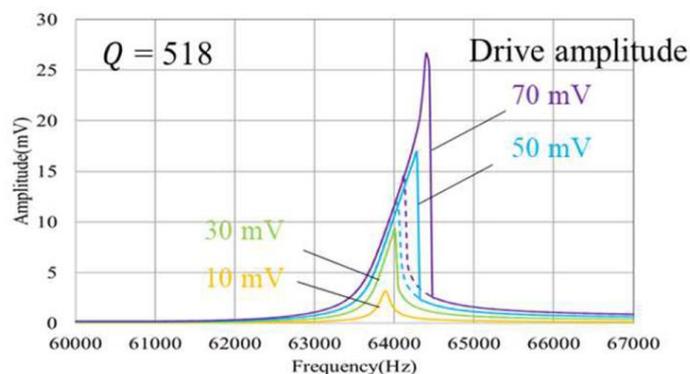


図 5 大振幅時の非線形振動特性

これらのデータをもとにした機械学習性能の評価として、加速度センサとしての感度すなわち加速度に対する振幅変化と学習性能の関係を調べた。図6は情報処理容量(IPC)タスクに示すように感度が高い場合は短期記憶性能が高く、感度が低い場合は非線形演算性能が良くなるという関係を見出している。

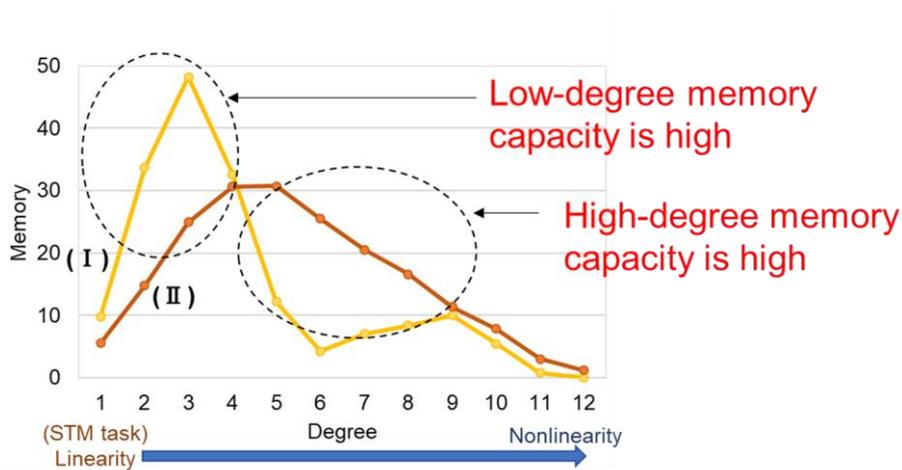


図6 加速度センサの感度(I)低感度 (0.15%/G) (II) 高感度 (0.6%/G) による記憶性能の違い。横軸の次数が高いほど非線形演算性能に影響し、低次数側が短期記憶性能に影響する

2-4 実加速度入力による学習タスクの検証⁴⁾

提案する加速度センサー一体型 MEMS 非線形振動子リザーバーの応用検討として、人間活動認識、つまり、ヒトの活動によって生じる振動からその活動状態を認識するタスクを試みた。今回はズボンのポケットに入れたスマートフォンから得られた振動データを導電型加振器で再現し、加速度センサに入力する。リザーバーとして用いている非線形振動子にはマスク関数で変調した共振周波数付近の周波数の加振信号を入力し、その振動振幅を検出、振幅をある一定周期でサンプリングして得られたデータ列をリザーバーの状態量としている。入力信号として歩行とジョギング時の X 方向（歩行方向に対して横方向）を用いて、それぞれ、学習、試験タスクを実施し、正解率を評価した。実験系の概略を図7に示す。

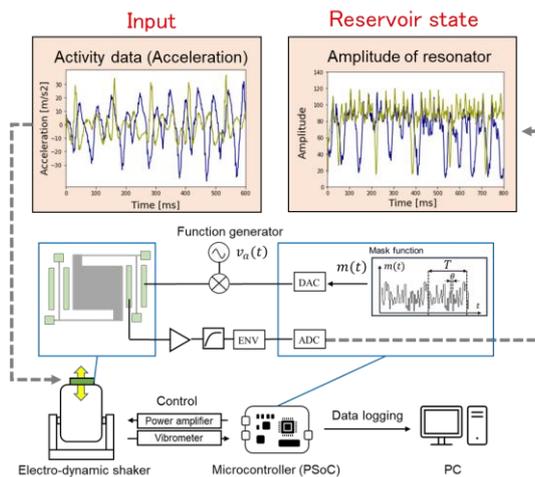


図7 加振器による振動入力を用いた実験系

上記のタスクにおいて、非線形振動子の特性と学習性能の関係を評価するために、入力データの周期と駆動周波数をパラメータとした。ここで、入力データの周期は元データが 100 ms で固定であったので時間圧縮して与えた結果を図8に示す。周波数応答特性は、今回の実験条件におけるリザーバー非線形振動子の周波数応答であり、駆動周波数との関係を示している。周波数応答特性がヒステリシスを示す 78.6~78.8 kHz、入

力データの周期 (=ノード間隔) が振動子の減衰時間 0.68 ms に近い、0.4~0.8 ms の時に高い正解率を示し、特に 78.8 kHz、0.8 ms の時に 98.8% という非常に高い正解率を示し、本デバイスが振動の識別に用いることが可能であることを示した。

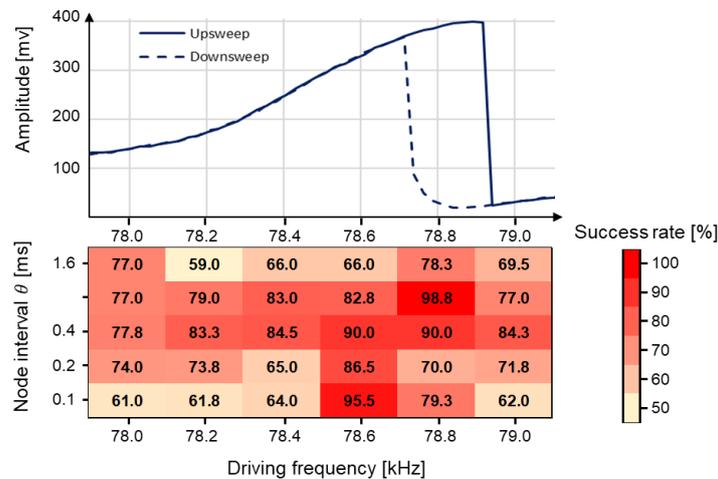


図8 歩行・ジョギングの識別タスクにおける正解率

この最高性能を示した条件での、リザーバ振動子の応答 (振幅のデータ) を図9に示す。図8に示した周波数応答特性のヒステリシスに対応して、振幅が大小の2つの状態間を移動していることが分かる。このような非線形応答が、高い正解率になっていると考察している。

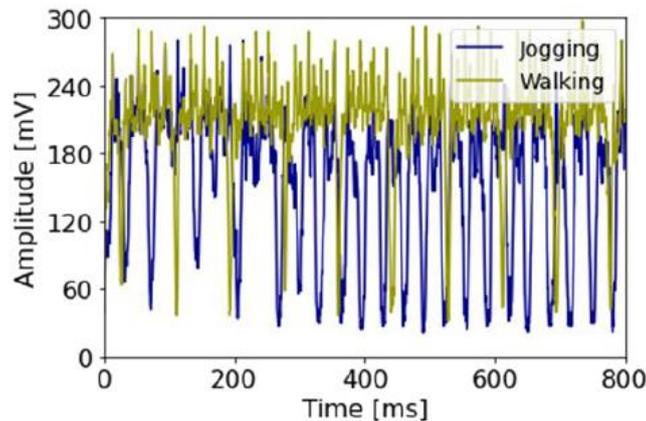


図9 正解率90%を示した条件 (78.8 kHz、0.4 ms) でのリザーバ振動子の応答

2-5 (100) モードマッチ単結晶シリコンリング形振動ジャイロ^{5), 6), 7)}

振動ジャイロスコープ(ジャイロ)は振動子に働くコリオリ力により回転角速度を検出するセンサであり、MEMS 技術を用いて様々な方式が提案されている。特にワイングラスモードで振動する円盤、円環、半球面などの軸対称形状の振動子を用いたジャイロは駆動・検出に用いる2つの振動モードの周波数を一致(モードマッチ)させることで高性能なジャイロを実現できるとして研究が進められている。単結晶シリコン振動子を用いた円環(リング)形振動子は一般に弾性率が面内で等方な(111)シリコンウエハを用いたモードマッチジャイロが多数報告されている。一方で、CMOS集積回路が製作され、最も汎用的な(100)ウエハを加工精度や製作コストを考慮して採用する試みも多数行われてきている。我々は以前に(100)シリコンの面内弾性率の異方性を補償するようにリングの幅を調整する方法を提案して検討を進めたが、この方法は半導体微細加工での加工誤差の影響を受けやすいという欠点があった。そこで本研究では図10に示すように、リングの幅は一定として、リングを支持する8本の梁をそれぞれ4つの長方形のばねを中央で接続したものにその長方形ばねの角を面取りした形状でリングの剛性を支持ばねの剛性で補償する方法を提案した。この構造では、面取り部の寸法 (L_1/L_2) を最適化することで8本の支持ばねの形状は完全に同一でありなが

ら、上記の剛性補償を実現し、モードマッチが可能であることを見出している。また、リング幅と支持ばねの梁幅を調整することで、加工誤差による、モードミスマッチ（2つのウィングラスモードの周波数差）の発生を最小限に抑えることができる。

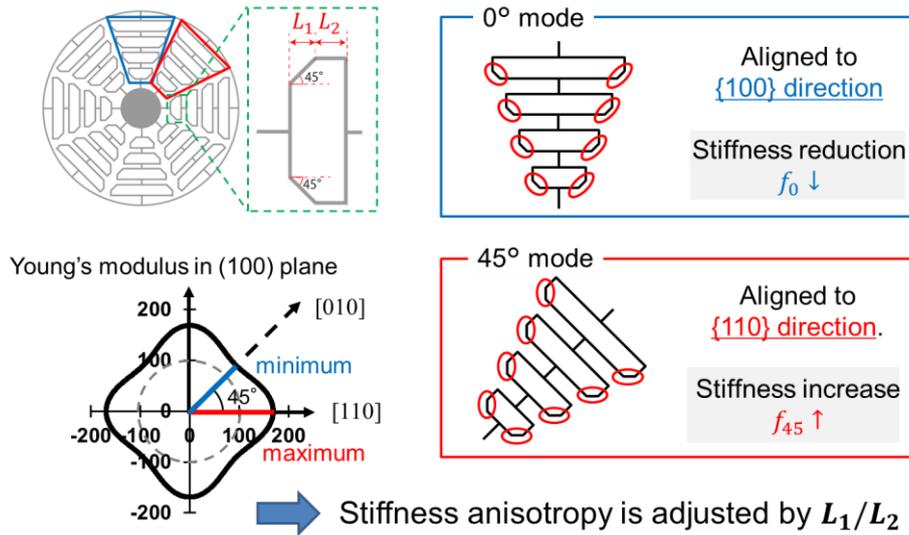


図 1 0 (100)単結晶シリコンを用いたリング型振動子。右下の図は(100)シリコンの面内弾性率の分布

有限要素法を用いてデバイス寸法を最適化した。リングの直径は 2 mm 中央の固定部の直径は 400 μm、リングの幅 5.1 μm、支持梁部の幅 5 μm で L_1/L_2 を 0.375 とした。このとき、0 度モード共振 $f_0 = 13825.4$ Hz、45 度モード共振 $f_{45} = 13825.3$ Hz となり、モードマッチしている。また、梁幅が 1 μm 減じたときとのミスマッチも 0.9 Hz と小さいことを確認しており、加工誤差への耐性が高いといえる。

このデザインで周辺に静電駆動、静電容量検出と共振周波数チューニングのための電極を 16 個配置した 3 mm、横 4 mm のチップを活性層厚さ 20 μm の SOI ウェハ上に作製した。電極として Au/Cr を使い、フォトリソグラフィとウェットエッチングでパターニングしたのちに、SOI の活性層をフォトリソグラフィとボッシュプロセスを用いたドライエッチングで加工した。チップ化したのちに気相フッ酸を用いたシリコン酸化膜のドライエッチングで稼働構造を基板からリリースした。

試作したリング型振動子を図 1 1 に示す。このチップではリングと電極のギャップを 3 μm に設計している。デバイスチップは 28 ピンのセラミックス DIP パッケージにダイボンド、ワイヤボンディングで配線した。図 1 2 に実験系を示す。ユニバーサル基板にパッケージを実装し、同じ基板には容量検出アンプも配置している。振動子の可動部を設置し、各電極には 5 V の dc バイアスを基準として印加している。駆動に用いる電極には dc バイアスに加えて振幅 10 mV の正弦波を与えて駆動した。容量検出アンプの出力はデジタルロックインアンプに入力し、デジタル信号処理によって励振、検出の処理を行っている。励振は 0 度モードの振動変位信号を基準として PLL 発振回路と自動振幅制御回路で一定周波数、一定振幅での共振振動を維持している。角速度検出側は 45 度モードの変位信号を 0 度モードの振動信号によって同期検波して角速度出力を得ている。

振動子を実装した基板はロータリーポンプで排気する真空チャンバーに設置している。この真空チャンバーには回転ステージがあり、これを駆動して角速度を与える。実験では十分に排気して 1 Pa 程度の真空度で測定、評価している。

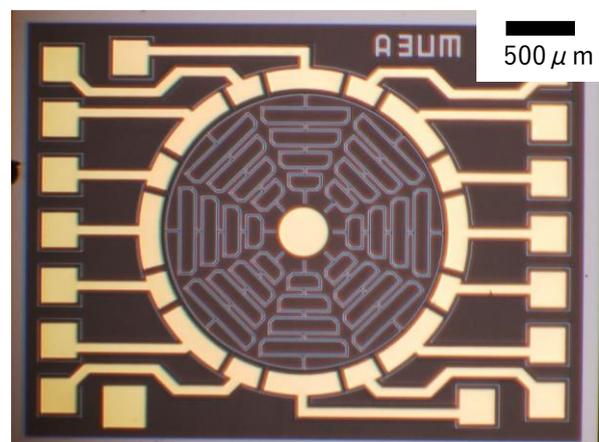


図 1 1 試作したリング型振動子

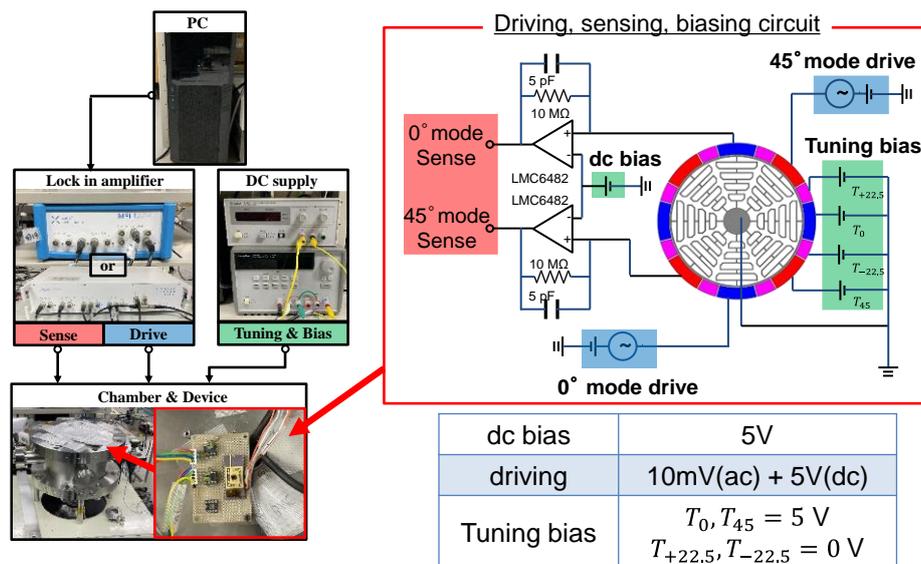


図 1 2 振動特性および角速度検出測定系

試作した振動子は静電チューニングなしでのモードミスマッチが 46 Hz~144 Hz (13 個測定) と 0.3% から 1% 程度あった。これは予想よりも大きかった。原因としてはリング部と梁部の幅の差が設計した $0.1\ \mu\text{m}$ から大きく外れて $0.28\sim 0.57\ \mu\text{m}$ (平均 $0.42\ \mu\text{m}$) であったことに起因する。設計では加工誤差が均一であると予想したが、シリコンのエッチングにおいてローディング効果で加工誤差がパターンによって異なっていたことが原因と考えている。このため静電チューニング電極に電圧を印加してモードマッチさせたが、この時の電圧は最大でも 20 V 程度であり、これまでの検討に比べて低い電圧で調整可能であった。

図 1 3 にジャイロとしての特性評価結果を示す。図 1 3 左は $60\ \text{deg/s}$ の一定回転を入力したときの角速度出力電圧をプロットしたものである。また、右図は感度をプロットしたものであり、感度は $3.8\ \mu\text{V/deg/s}$ である。また、バイアス安定性を評価したところ $278\ \text{deg/h}$ であった。

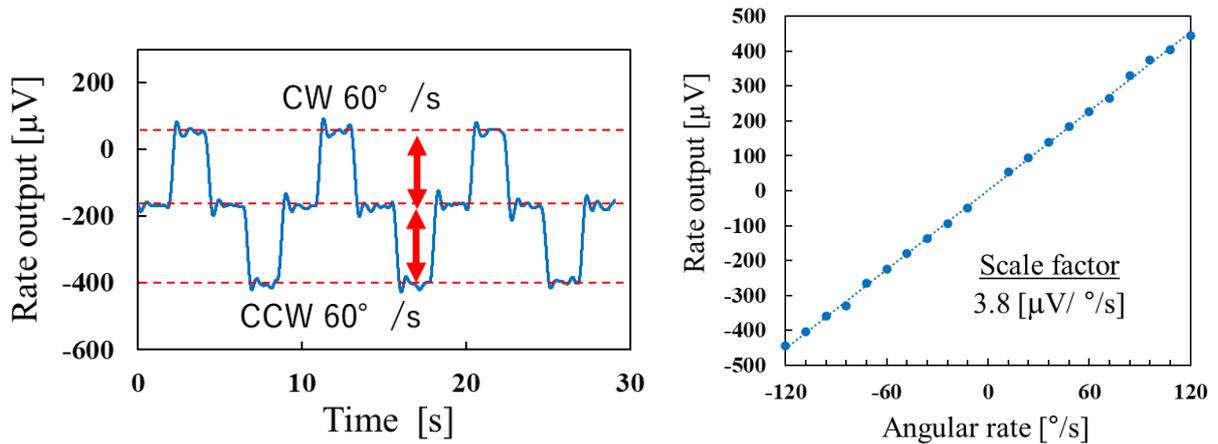


図 1 3 角速度センサ特性。左) $\pm 60\ \text{deg/sec}$ の回転に対する角速度出力、右) 感度

2-6 表面弾性波デバイスを用いた物理リザーバー計算^{8), 9)}

慣性センサに一体化するシリコン製振動子の共振周波数は $10\ \text{kHz}\sim 1\ \text{MHz}$ で設計されることが多く、加速度センサで検出される $1\ \text{kHz}$ 程度までの入力信号に対応できると考えているが、一方で音声や振動などの信号では $100\ \text{kHz}$ までの信号などを処理することが求められる。そこで我々は表面弾性波素子に注目している。表面弾性波素子は高周波のフィルタとして広く用いられており、高い Q 値とセンサとの集積化という点で同様の利点がある一方で、表面弾性波素子は高い線形性を示しており、非線形演算能力の実現に

は課題があり、本研究においては非線形性の付与、および、遅延素子を組み込んだ遅延フィードバックと組み合わせて、表面弾性波素子による物理リザーブコンピューティングを実装することを目指した。

図 1 4 に本研究で用いる遅延フィードバックによる物理リザーブシステムを示す。一定の時間間隔 τ ごとに入力される信号は非線形物理ダイナミクスに入力され、非線形変換されて出力される。この出力を次の入力に戻して加えることで、短期記憶性能を付与しようというものであり、光学系をもちいた物理リザーブコンピューティングでよく用いられる手法である。本研究ではこの非線形物理ダイナミクスに非線形性を付与した表面弾性波共振素子を用いて、機械学習タスクを行った。

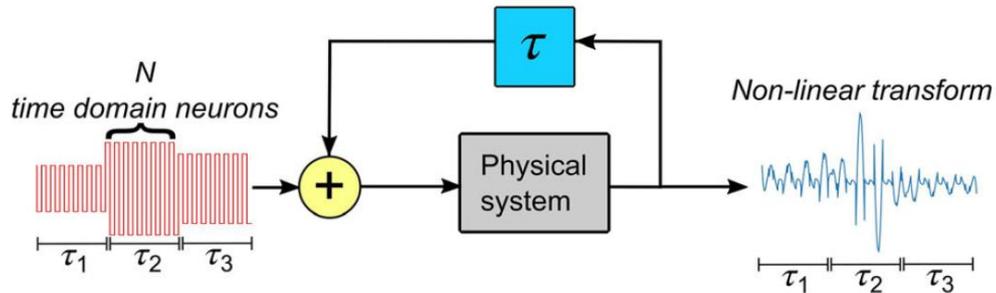


図 1 4 遅延フィードバックを用いた物理リザーブシステム

図 1 5 に表面弾性波素子のデバイス構造を示す。中央に共振器が配置され、その全長は 25 波長に相当する。Fabry-Perot 空洞共振器の両端には反射器が配置されている。デバイスは Y カットのニオブ酸リチウム単結晶ウエハを用いた。駆動、検出用の楕型電極 (IDT) は電極ピッチ=波長が $87.2 \mu\text{m}$ で中心周波数が 39.16 MHz に設計されている。電極としてアルミニウム膜 (厚さ 100 nm) を用い、デバイスはリフトオフプロセスで作製している。ダイシングして短冊状にカットしたデバイスは専用で作製した PCB 上にマウントしワイヤボンディングで配線して、評価した。

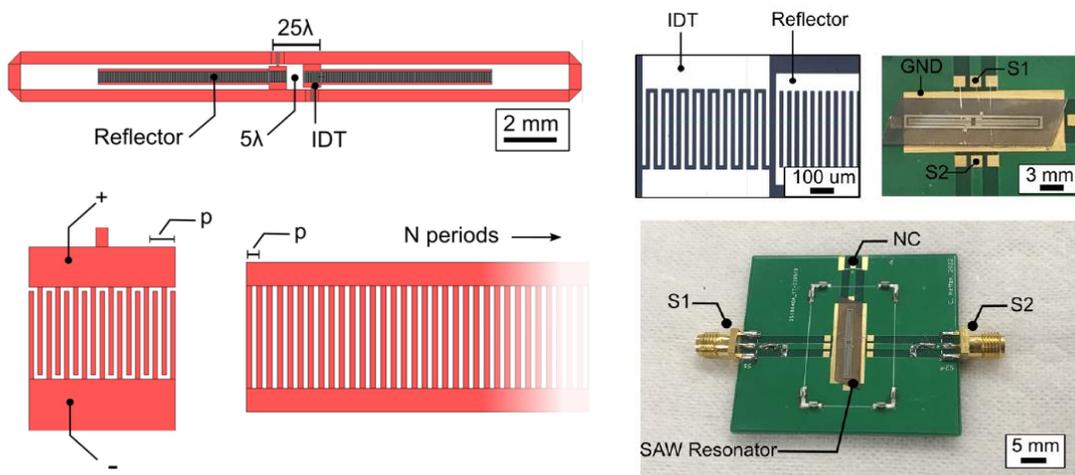


図 1 5 物理リザーブに用いた表面弾性波素子

図 1 4 にベクトルネットワークアナライザで評価した表面弾性波共振器の共振特性を示した。プロットは反射器のパターン数の依存性を示している。パターン数が多いほど表面弾性波の Q 値が高くなり、最も多き 200 周期の反射器では 1600 を得ている。Q 値の調整はリザーブの応答特性の制御に必要であり、重要な結果である。

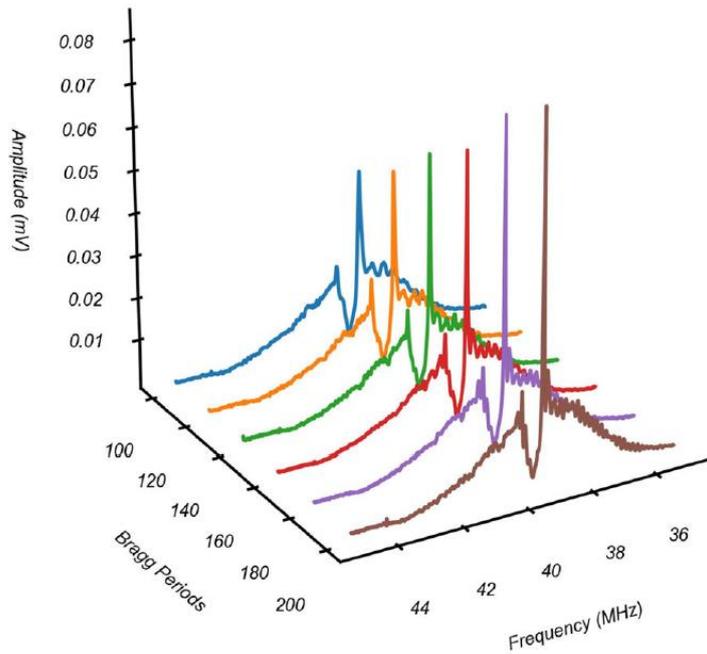


図 1 6 表面弾性波素子の周波数特性の反射器 (Reflector) パターン数依存性

Q 値 1600 の共振器を用いて機械学習タスクを行った。図 1 7 に次数を 2 から 7 としたパリティベンチマークの結果を示す。ヒートマップは駆動周波数とマスク関数の周期 θ 、(ノード数を N とすると $\tau = N\theta$ の関係) を変化させている。検討した領域で θ の影響は小さいが駆動周波数では共振よりも低い駆動周波数の領域で正解率が高い傾向を示している。これらの結果は表面弾性波共振器が物理リザーバー計算に応用可能であることを示している。

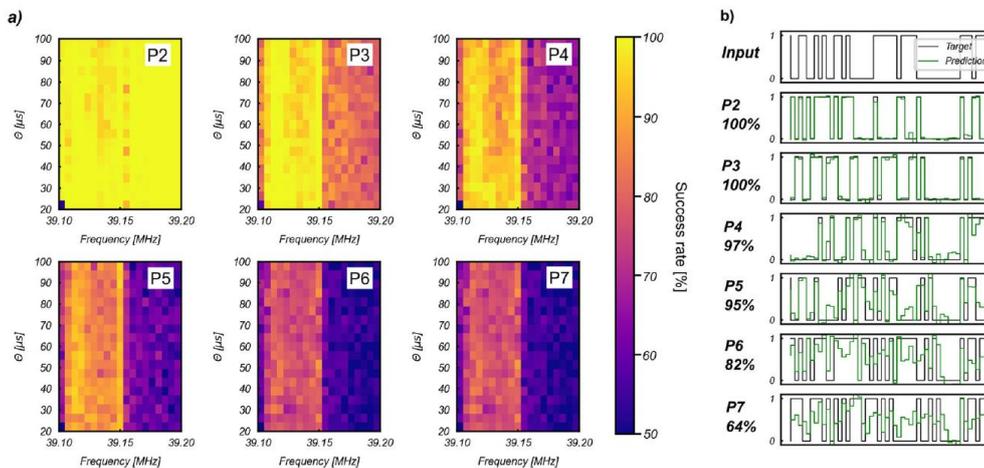


図 1 7 パリティベンチマーク結果

3 まとめ

機械学習の一つである時系列データを比較的簡単な学習で処理でき、物理現象でニューラルネットワークを構成するため低消費電力化、小型化が可能と期待されている物理リザーバーコンピューティングとして、非線形振動子からなるリザーバーを加速度センサと一体化し、特徴ある振動入力に対する応答が構造レベルで可能な知能化加速度センサの実現を検討した。周波数変調型加速度センサに着目し、加速度を検出する振動子

を非線形ダイナミクスとして活用したセンサー一体化型リザバーを構成し、ヒトの活動状態の判別に適用した。結果として、歩行とジョギングを90%以上の高い正解率で判別できることを示した。また、将来の展開を見据えて、リング型振動ジャイロの開発を行った、(100)シリコンでモードマッチを達成し、角速度出力を確認した。今後、リザバー振動子との一体化に向けた検討を進める。さらに、新たな物理リザバーとして表面弾性波デバイスを物理リザバーとして用いた機械学習システムを構築した。遅延フィードバックシステムを構築しパリティベンチマークで、機械学習性能を確認した。

今後は、MEMS振動子、共振器の改良や新たなシステムの提案、素子や動作パラメータの最適化の検討を行い、システムを小型化して可搬システムで実際の振動や人体活動の判別をリアルタイムで行う実験を進めていきたい。

【参考文献】

- 1) C. Comi, A Corigliano, G. Langfelder, A. Longoni, A. Tocchio. And B. Simoni, A New Two-Beam Differential Resonant Micro Acceleromete, 2009 IEEE Sensors, pp. 158-63 (2009). DOI: 10.1109/ICSENS.2009.5398209.
- 2) T. Mizumoto, A. Banerjee, J. Hirotsu, T. Tsuchiya, Neuroaccelerometer using reservoir computing with parametric nonlinear response, The 48th International Conference on Micro & Nano Engineering (MNE) and Eurosensors 2022, Leuven, Belgium (Sep. 19-23, 2022), T3-P1-TuA-047.
- 3) 水本 昂宏, Banerjee A., 廣谷 潤, 土屋 智由, 知能化共振加速度センサの記憶容量と感度の関係, 第14回集積化MEMSシンポジウム, アスティとくしま, 徳島, 2022年11月14-16日, 14P3-C-1
- 4) H. Takemura, T. Mizumoto, A. Banerjee, J. Hirotsu, and T. Tsuchiya, Physical Reservoir Computing using Nonlinear MEMS Resonator Having High Memory Capacity at "Edge of Chaos", The 36th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2023), Munich, Germany, (Jan. 15-19, 2023), pp. 515-519. DOI: 10.1109/MEMS49605.2023.10052286
- 5) 岡山 修也, 廣谷 潤, Banerjee, A., 土屋 智由, 加工誤差への耐性を有する(100)単結晶シリコンリング型ジャイロの開発. 令和4年度電気学会E部門総合研究会, マイクロマシン・センサシステム/ケミカルセンサ/バイオ・マイクロシステム 合同研究会, 金沢, 2022年6月7-8日, MSS-22-019
- 6) 武田 侑大, 水本 昂宏, 竹村 拓樹, Banerjee A., 廣谷 潤, 土屋 智由, 熱膨張アクチュエータによる変調機構を備えた環状結合非線形振動子群によるMEMSリザバーコンピューティング, 日本機械学会2022年度年次大会, 富山大学, 2022年9月11-14日, J223-08
- 7) S. Okayama, A. Banerjee, J. Hirotsu, T. Tsuchiya, Mode-matched (100) single crystal silicon ring gyroscope robust to fabrication errors, The 48th International Conference on Micro & Nano Engineering (MNE) and Eurosensors 2022, Leuven, Belgium (Sep. 19-23, 2022), T2-F-WeA
- 8) C. Meffan, A. Banerjee, J. Hirotsu, T. Tsuchiya, A non-linear SAW resonator as a reservoir computing node, 2022 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment (MIPE 2022), Nagoya, Japan, Aug. 28-31, 2022, A2-2-03.
- 9) C. Meffan, T. Ijima, A. Banerjee, J. Hirotsu and T. Tsuchiya, Non-linear processing with a surface acoustic wave reservoir computer, Microsystem Technologies, (2023) available online, DOI: 10.1007/s00542-023-05463-4

〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
Non-linear processing with a surface acoustic wave reservoir computer	Microsystem Technologies	2023年5月
[Plenary Lecture] MEMS Reservoir Computing -Sensors Become More Intelligent-	Asia-Pacific Conference of Transducers and Micro-Nano Technology (APCOT 2022)	2022年5月
A non-linear SAW resonator as a reservoir computing node	2022 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment (MIPE 2022)	2022年8月
Neuroaccelerometer using reservoir computing with parametric nonlinear response	The 48th International Conference on Micro & Nano Engineering (MNE) and Eurosensors 2022	2022年9月
Mode-matched (100) single crystal silicon ring gyroscope robust to fabrication errors	The 48th International Conference on Micro & Nano Engineering (MNE) and Eurosensors 2022	2022年9月
Physical Reservoir Computing using Nonlinear MEMS Resonator Having High Memory Capacity at “Edge of Chaos”	The 36th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2023)	2023年1月
加工誤差への耐性を有する(100)単結晶シリコンリング型ジャイロの開発	令和4年度 電気学会E部門 総合研究会, マイクロマシン・センサシステム/ケミカルセンサ/バイオ・マイクロシステム 合同研究会	2022年6月
熱膨張アクチュエータによる変調機構を備えた環状結合非線形振動子群によるMEMSリザーブコンピューティング	日本機械学会 2022年度年次大会	2022年9月
知能化共振加速度センサの記憶容量と感度の関係	第14回集積化MEMSシンポジウム	2022年11月