

[研究助成 (A)]

円環型振動子を用いたセンサー一体型
MEMS リザーバーコンピューティング

Sensor-integrated MEMS Reservoir Computing using Ring Resonator

2211021



研究代表者

京都大学 大学院工学研究科

教授

土 屋 智 由

[研究の目的]

IoT センサノードに 1 次信号処理機能を持たせる、すなわち「知能化」するため MEMS センサ構造に機械学習機能を一体化したニューロセンサの実現を目的とする。機械学習機能には微小電気機械システム (MEMS) 非線形振動子群で構成する物理リザーバーコンピューティングを用いる。そして、センサと物理リザーバーを構成する機械構造を Si 基板上に一体化で製作する。これをセンサノードに用いることでセンシング量から情報 (例: 地震波, モータの異常振動) をノード上で抽出・検出可能となる。これにより、遠隔で信号処理するサーバへの通信量, 消費電力が減少し, 高性能で高信頼なセンサネットワークを提供することで, より安全で安心な社会の構築に寄与することが期待される。

[研究の内容, 成果]

物理リザーバーコンピューティングは機械学習のアルゴリズムの一つであり, ニューラルネットワークの隠れ層に時間的な結合をもたせたリカレントニューラルネットワークにおいて, 隠れ層の多数のノードが一定の結合を保持しながら時間的に状態遷移する複雑なダイナミクスを物理的な非線形現象を用いて実装する手法である。この物理リザーバーと呼ばれる隠れ層には

1. 入力に対する応答の非線形性, 2. 短期記憶

性, 3. 内部状態の高次元性などの性質によって時系列信号の非線形な入出力関係を近似している (図 1)。

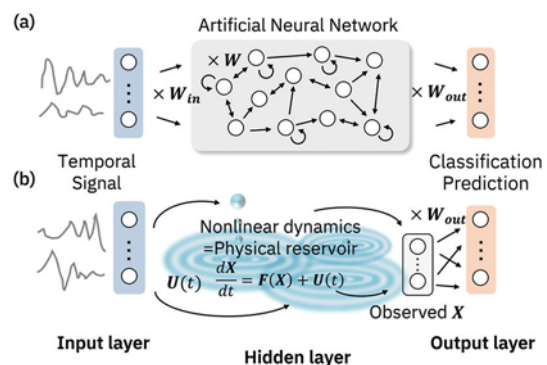


図 1 (a) リカレントニューラルネットワークと
(b) 物理リザーバーコンピューティング

本研究ではこの物理リザーバーを単一あるいは複数の MEMS 非線形振動子で実現しようというものであり, 特に振動型センサの代表である振動型ジャイロにリザーバー振動子を一体化することを目指して研究を行った (図 2)。

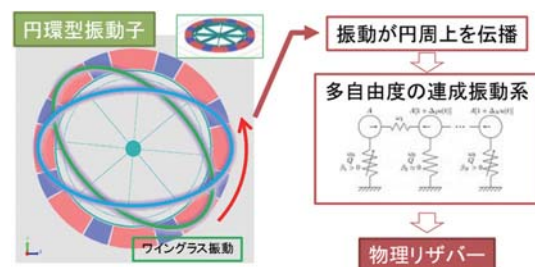


図 2 円環振動子による物理リザーバーの実装

1. 円環型振動子を用いた (100) シリコン振動ジャイロスコープ

汎用性の高い (100) SOI ウエハを用いた高精度な振動ジャイロスコープの研究を進めている。これまでに (100) シリコンのヤング率の面内異方性を円環幅の調整で補償して周波数同調型（モードマッチ）ジャイロスコープとすることを提案した¹⁾。加工ばらつきによる周波数差を静電チューニングで調整する手法を検討した。図3は活性層厚み $20\ \mu\text{m}$ 、直径 $1\ \text{mm}$ の円環振動子である。幅は $\{100\}$ 方向で $8\ \mu\text{m}$ 、 $\{110\}$ 方向で $7.34\ \mu\text{m}$ に設計され、数値計算解析ではモードマッチが可能であった。しかし、加工ばらつきによる寸法誤差で、試作した振動子は大きいもので $100\ \text{Hz}$ 以上の周波数差を示した。モードマッチを実現し、さらに振動モードの節を電極パターンと一致させるため、図4の駆動、検出、チューニング電極配置で検討した。

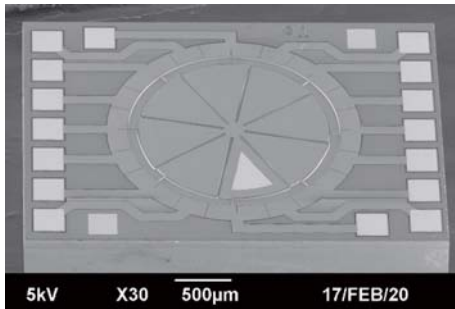


図3 (100) シリコン円環振動子

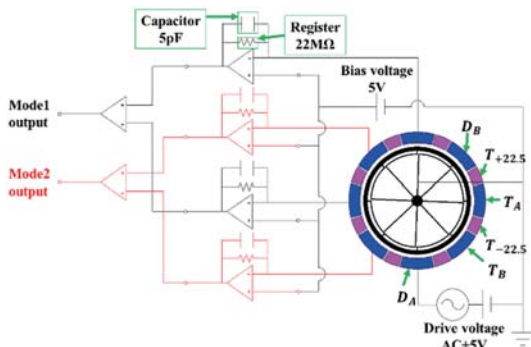


図4 周波数チューニング実験用回路

結果、図5に示すように、 22.5° に位置する電極に与える電圧で $10\ \text{Hz}$ (0.1%) のミスマッチとすることを確認した。しかしこの時、ワイ

ングラス振動モードの節が回転し、漏れ振動の原因となったため 0° 、 -45° の電極への電圧を調整して、最終的にはモードの回転を抑制しながら、モードマッチを実現可能であることが示された。

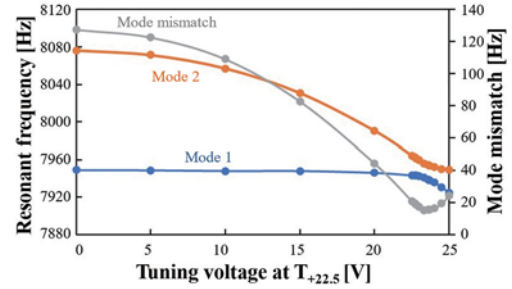


図5 チューニング電圧による周波数調整

2. 周波数変調型加速度センサを一体化したりザバーコンピューティング

次に、センサー体型 MEMS リザーバー計算の検討として周波数変調型加速度センサを用いた検討を行った。

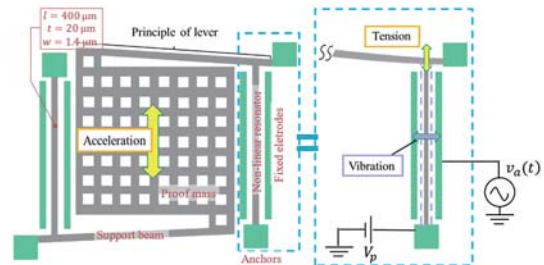


図6 周波数変調型 SOI 加速度センサ

センサの構造模式図を図6に示す。この構造は周波数変調型加速度センサと呼ばれ上下の2本の左右に延びる梁で中央のおもりを支持し、上下方向の加速度に対する慣性力を支持梁で増幅し、左右に設置された両端支持梁に印加される張力でたわみ剛性を変化させ、共振周波数変化として加速度を検知する。ここでは両端支持梁の両側に一對の固定電極を配置し、左右で静電駆動、静電容量変位検出を行なう。この両端支持梁は大振幅において幾何学的非線形性を有することを利用して、加速度に比例した張力を入力としたリザーバーコンピューティングに適用

する。

活性層厚さ $15\ \mu\text{m}$ の SOI ウエハを用い、標準的な MEMS 微細加工プロセスで試作したデバイスを図 7 に示す。

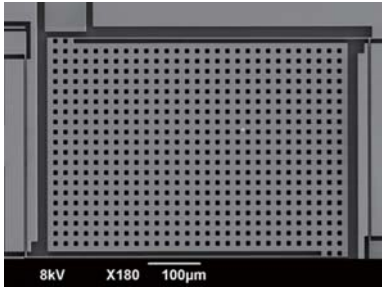
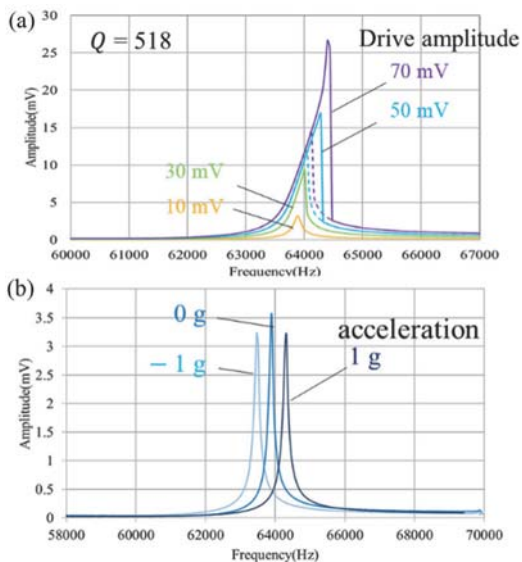


図 7 試作した周波数変調型 SOI 加速度センサ



(a) 振幅依存性, (b) 加速度入力依存性

図 8 非線形振動子の周波数特性

この両端支持梁の運動方程式をダフリング方程式で表現し、周波数特性をフィッティングして振動子の物理パラメータを抽出し、遅延ループ型リザバーとしてベンチマーク評価した。図 8 は両端支持梁振動子の周波数特性である。大振幅領域では硬化ばねによる非線形性が現れている。一方小振幅のもとでも重力加速度を印加すると共振周波数が $400\ \text{Hz}$ ほど変化していた。これらの特性から、両端支持梁は加速度に変化によって周波数変調が可能であり、非線形性も有することからリザバーとして有用であることを確認した。

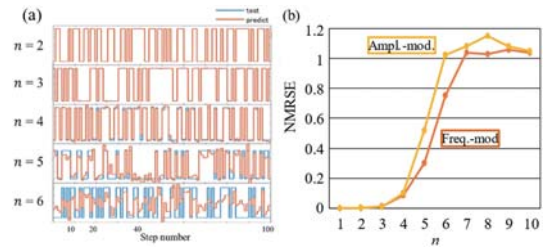


図 9 パリティベンチマーク結果

次に測定した振動子の特性を用いて、遅延フィードバック型の物理リザバーを構成し、学習性能をパリティベンチマークで評価した (図 9)。(a) は記憶ステップ数を増やした時のパリティ予測結果で $n=5$ 以下で予測誤差が小さい。また、同一振動子パラメータで周波数変調による検出と振幅変調による動作を比較したところ周波数変調のほうが記憶性能が高い (二乗平均平方根誤差 (NMRSE) が小さい) 結果が特に $n=5\sim 6$ で観察され、提案する周波数変調法の有用性を示した。

3. 非線形振動子アレイを用いた時間展開型リザバーコンピューティング

これまでに報告された MEMS 非線形振動子を用いたリザバーは遅延フィードバックの信号処理を計算機に頼り、消費電力の改善に限界がある。ここでは非線形振動子アレイの振動減衰特性、非線形性を活用した物理リザバーを構成しその学習性能を評価する。図 10 は設計した非線形振動子アレイの概念図である。

同一形状の振動子間に静電容量が形成され、バイアス電圧を一つおきに印加することで静電

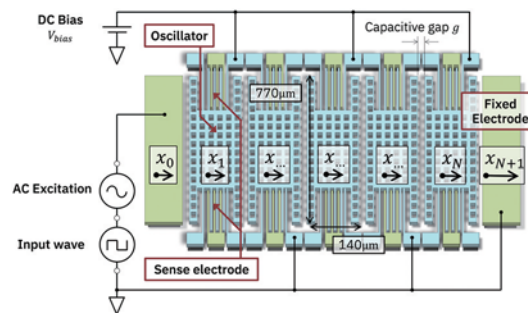


図 10 非線形振動子アレイの概念図

力で振動子は結合している。一端の振動子に入力を加えて、各振動子の変位を検出、その振幅値を出力とする。リザーバー計算の手順を図 11 に示した。振動子の共振周波数の正弦波を入力電圧で振幅変調し、リザーバーに入力する。各振動子の振幅を静電容量変位センサで検出しエンベロープを一定時間間隔でサンプリングし、重

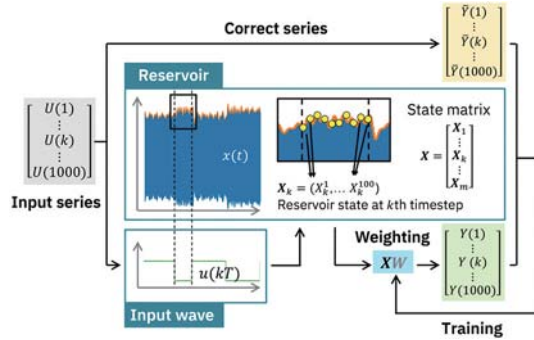
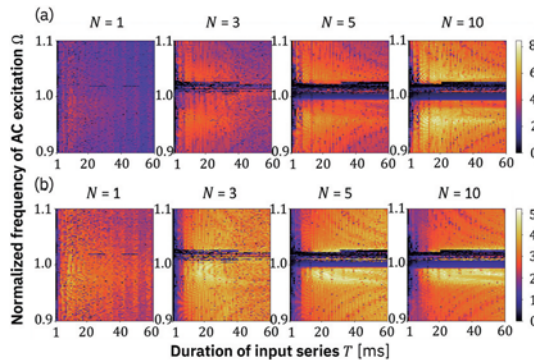


図 11 リザーバー計算の手順



(a) STM タスク, (b) PC タスク

図 12 記憶容量の分布

みづけして合成した出力を得る。

短期記憶性能を Short term memory (STM)、非線形演算性能を Parity check (PC) タスクで評価した。共振周波数（縦軸 $\Omega=1.0$ ）の近傍で高い性能（黄色）の領域がみられ、これは非線形振動による不安定領域の近傍で非線形処理能力が高いことを示している。一方で振動子数を増やすと性能が向上した。過渡応答が複雑化することで記憶容量が増大する傾向を確認し、

振動子アレイを用いた簡易なシステムで学習性能が得られることが予測された。

[今後の研究の方向, 課題]

円環型振動子は非線形性が弱く、また、記憶性能を高めることが困難である。今後は実センサと統合した円環型振動子や振動子アレイを用いた物理リザーバーを構成し、知能化センサ実現に向けた最適設計論の構築や、実デバイスによる性能評価に展開していく。

[参考文献]

- Yunyi Shu, Yoshikazu Hirai, Toshiyuki Tsuchiya, Osamu Tabata Geometrical Compensation for Mode-Matching of (100) Silicon Ring Resonator for Vibratory Gyroscope Jpn J. Appl. Phys. 58 (SD), 2019, SDDL06.

[成果の発表, 論文等]

- 水本昂宏, 平井義和, 土屋智由, “周波数変調型加速度センサを用いた MEMS リザーバーコンピューティング,” 第 13 回集積化 MEMS シンポジウム, 応用物理学会, 2022/11/9-11, Online, 10A3-AP-5.
- 竹村拓樹, 平井義和, Banerjee Amit, 土屋智由, “MEMS 振動子アレイの動的応答を利用した時系列信号処理,” 第 38 回センサ・マイクロマシンと応用システムシンポジウム, 電気学会, 2022/11/9-11, Online, 10P2-SS3-6.
- 岡山修也, 平井義和, Banerjee Amit, 土屋智由, “リング型振動ジャイロスコープにおける静電チューニングのワイングラスモード回転への影響評価,” 第 38 回センサ・マイクロマシンと応用システムシンポジウム, 電気学会, 2022/11/9-11, Online, 9A3-SS3-3.
- Takahiro Mizumoto, Yoshikazu Hirai, Amit Banerjee, and Toshiyuki Tsuchiya, “MEMS Reservoir Computing using Frequency Modulated Accelerometer,” The 35th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2022), Tokyo, (January 9-13, 2022), pp. 487-490.