

令和 5 年 6 月 6 日現在

機関番号：34315

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K21820

研究課題名（和文）ヒトを模した機械触覚認識のためのシリコン・スパイクング・ニューラルネットの研究

研究課題名（英文）Research for Spiking Neural Network for Tactile Information processing

研究代表者

野間 春生（Noma, Haruo）

立命館大学・情報理工学部・教授

研究者番号：00374108

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究開発を通してヒトを模した触覚情報処理システムを実現し、ヒトの触覚認識と
の特性比較からヒトの触覚の解明と人工触覚の応用を最終的な研究目標とした。その萌芽研究成果として、リアル
タイム触覚情報処理のためのハードウェアによる機械学習の基礎開発に向けて、MEMS触覚センサからの信号を
デジタル回路により込み、パルス密度によって駆動されるニューラルネットによる非線形信号処理の可能性を実
証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

視覚や聴覚に比べて、触覚は情報システムとしての実用化が遅れている。その理由は、映像や音声は観察により
対象物に影響を及ぼさないため、それらの画像/音声認識処理では計測データを一時的に記録したオフラインで
の認識が可能である。しかし触覚は対象物の感触に合わせて触れること、即ち、機械的なストレスを積極的に制
御しながら対象物に与えた結果として、対象物と一体となって生じる運動を機械刺激として感じる感覚である。
本研究では、このような触覚をメディアとして扱うための基礎研究開発を実施した。

研究成果の概要（英文）：Through this research and development, we have realized a tactile
information processing system that imitates humans, and our ultimate research goal is to elucidate
human tactile perception and to apply artificial tactile perception by comparing its characteristics
with those of human tactile perception. As a result of this research, we demonstrated the
possibility of nonlinear signal processing by a neural network driven by pulse density by including
signals from MEMS tactile sensors by means of digital circuits, toward the basic development of
hardware-based machine learning for real-time tactile information processing.

研究分野：触覚ヒューマンインタフェース

キーワード：触覚 ヒューマンインタフェース ロボット VR

1. 研究開始当初の背景

ヒトを模した触覚情報処理システムの実現のため、複数の触覚センサ素子を接続可能なハードウェアによる機械学習の基礎開発を実施し、以降の本格研究に繋げる。

映像や音声は観察により対象物に影響を及ぼさないため、それらの画像/音声認識処理では計測データを一時的に記録したオフラインでの認識が可能である。しかし触覚は対象物の感触に合わせて触れること、即ち、機械的なストレスを積極的に制御しながら対象物に与えた結果として、対象物と一体となって生じる運動を機械刺激として感じる感覚である。従って人が触れるときに感じる感覚を再現するには、ヒトなみの密度で実装した小型の触覚センサを、実際に動かしながらのリアルタイム認識処理が不可欠である。生理学的には人の指先には 1cm^2 あたり数百個の触覚受容器が存在し、それらの受容器の機械刺激に対する感度は $100\text{-}200\text{Hz}$ の振動でもっとも高い。これを再現するには、 100 個/ cm^2 以上でセンサを配置し、後段の信号処理システムもサンプリング定理から考えて 500Hz 以上の処理が求められる。これを実現する鍵は多素子の超小形半導体触覚センサとリアルタイムニューラルネットワーク処理である。すでに提案者らは大きさ $150\mu\text{m}$ の超小型の機械触覚センサ素子を 12 個搭載した触覚センサを実現した。本提案ではこの素子を 100 個/ cm^2 規模で実装する触覚アレイセンサでのリアルタイム信号処理のための基礎研究を実施した。

これまで開発した半導体触覚センサ (図1左上) はシリコン基板上に先端がそり上がったカンチレバー構造をエラストマ(弾性体)で覆った構造であり、センサにかかる外力によって生じるエラストマとカンチレバーの機械的変形をカンチレバー上の NiCr ゲージの変形として電氣的に計測する。従来はこのセンサの出力をアナログ回路と A/D 変換を経て計算機に取り込んでいた。さらにこの計算機内で触覚による素材識別処理を研究してきた。その結果 8 種類の素材識別課題において識別率 90% 以上を達成した。数本のカンチレバーならばこの方式で対応可能である。しかし、 100 本以上のカンチレバーの計測が必要になると、触覚センサそのものの小型化に対して、接続回路が物理的に無視できない規模となる。

2. 研究の目的

本研究提案では、図1に示すように触覚センサの NiCr ゲージの抵抗変化を発振回路によってパルス周波数変調する仕組みと、ニューロンをカウンタ回路と分周/逡倍回路によるハードウェア群で実現し、センサに相当する上流からパルス頻度によって情報を下流に出力するパルス頻度 (Pulse Density Modulation) を制御する仕組みを研究する。このいわゆるスパイクング ニューラル ネットワーク (SNN: Spiking Neural Network) を解決方法として導入し、高密度小型センサとリアルタイム機械学習という二つの課題を解決する。具体的には、機械学習部分について計算機上でシミュレーションによって模擬的に学習を進め、その結果を FPGA (Field Programmable Gate Array) にダウンロードして、識別処理のみをハードウェア実行する仕組みを開発して、効果を検証する。将来、この触覚センサとインタフェース部と機械学習の SNN 部が

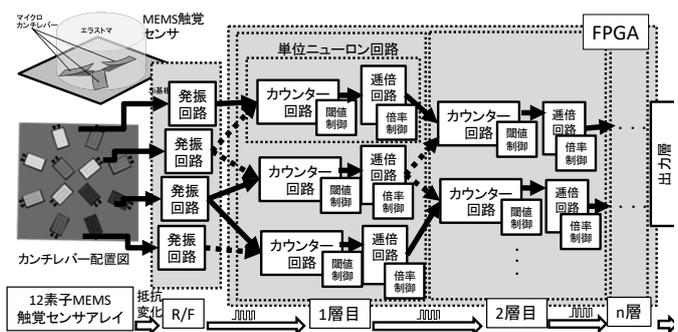


図1 SNN: Spiking Neural Network の構成

専用回路で実装出来れば、単純な仕組みであるため小規模回路となり、触覚センサの近傍に回路を組み込むことが可能になる。これは同時に、耐ノイズ性と省電力化についても貢献する。

この研究開発を通してヒトを模した触覚情報処理システムを実現し、ヒトの触覚認識との特性比較からヒトの触覚の解明と人工触覚の応用を最終的な研究目標としている。その萌芽研究として、リアルタイム触覚情報処理のためのハードウェアによる機械学習の基礎開発を実施して以降の本格研究に繋げることを目標とする。

3. 研究の方法

(1)触覚センサアレイのためのパルス密度変換器の開発

ヒトの触覚受容器に倣った機械触覚受容器を作製することを目的とし、高密度に複数の触覚受容器を配置する際に起こると考えられる配線数の問題と消費電力の問題を解決する。従来はアナログ回路によって微小な抵抗値変化を電圧変化に変換しアンプで増幅することで信号の伝達を行っていたが、主にアンプによる消費電力が大きいことと、回路に使用する配線数が多いことが問題となる。そこでデジタル回路を使用すること

で消費電力と配線数の削減を目指す。提案手法は非安定マルチバイブレータと呼ばれる発振回路を FPGA に組み込むことでセンサからの抵抗値変化をパルス密度に変換する手法である。非安定マルチバイブレータとは、CMOS インバータの入出力に抵抗とコンデンサを接続して発振現象を引き起こす回路である。発振周波数は抵抗値と静電容量の値で決まり、HIGH と LOW を繰り返す矩形波を生み出すためこれがパルス密度となる。静電容量が定数の場合、抵抗値の変動が

パルスの密度に変換される仕組みとなる。本研究で使用する非安定マルチバイブレータは、図 2 に示すように CMOS インバータによる NOT 回路を 2 つ使用し、それぞれの入出力に抵抗式の触覚センサとコンデンサを一つずつ接続する。ここの回路を後段の処理回路と合わせて実現する為に FPGA への実装した。単純な発振現象を起こす分には図 2 に示した回路で十分であるが、抵抗値の変動が少ないセンサを使用する場合、パルス密度による変化が小さく後の識別に十分な変動が出ない可能性がある。そこで抵抗値の変動が少ないセンサを使用する場合はミキサーを含んだ回路も FPGA 上に構成する。ミキサーには XOR 回路を構成しており、入力にはセンサから起きているパルスと FPGA に内蔵されているクロックを使用する。XOR は 二つの入力のうなりを出力する作用があるため、分周したクロックによる周波数と標準状態の発振周波数と合わせることで出力には変動した分のみのパルス密度が出力される。

これにより抵抗値変化の小さいセンサに対してもパルス密度の変化率を上げることが可能になった。ミキサーを用いた際に生じる問題として、信号の周波数が高くなることが挙げられる。これはうなりの特性上ミキサーの出力波形は入力信号の周波数の和が出力されるためである。出力される信号の周波数が高くなれば、その信号を処理する際の計算機のサンプリングの周期を高くする必要がある。そこで FPGA 内にさらにローパスフィルタを構成することで、うなりの周波数の成分のみを出力する。デジタルフィルタには、FIR フィルタを用いた。FIR モジュール内では数 bit の FIFO のレジスタが存在し、クロック毎にレジスタの更新とレジスタ内の和を求めることでその和の閾値を超えた際に HIGH と LOW を切り替える仕組みである。

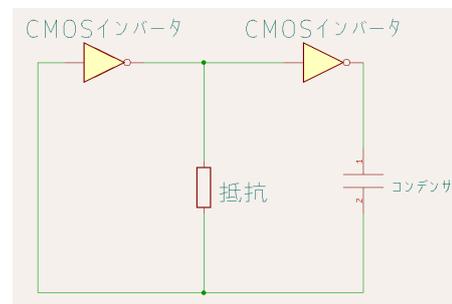


図 2: 非安定マルチバイブレータによる発振回路

(2)高速多入力処理可能な FPGA による触覚情報技術

前述のように MEMS 触覚センサの抵抗値変化をデジタルパルスの密度として出力された結果を、再構成可能なパルススペースのデジタル回路による触覚情報処理システムとして実現した。このシステムによって、ヒトの触覚器官のように配置された数百の MEMS 触覚センサは、1kHz 程度の高速サンプリングのうえ、ハードウェアで構成されるニューラルネットワークによって処理される。そのために、まず FPGA 上にデジタルパルスを用いる Spike Perceptron を構成し、MEMS 触覚センサからの入力を専用ハードウェアによって処理する基本的な枠組みを提示した。また、ソフトウェア上で学習した Multi-Layer Perceptron (MLP) のパラメータを Spike Perceptron に適用する実験を実施した。

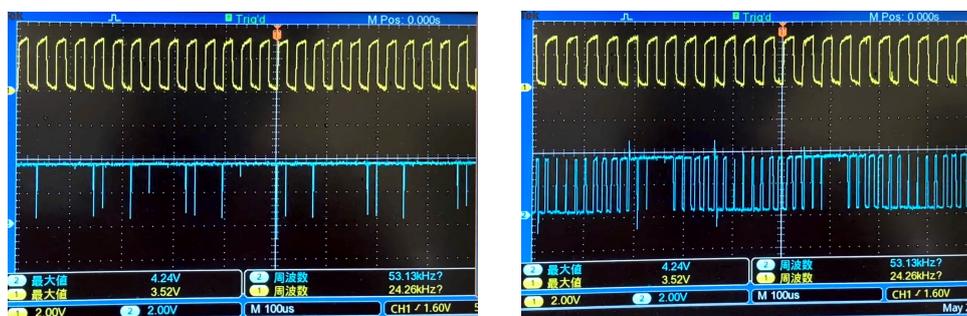
4. 研究成果

(1)触覚センサアレイのためのパルス密度変換器の開発

図 3(a)は MEMS 触覚センサを接続した時の標準状態の出力結果である。ミキサーからの出力がほぼ常に HIGH 状態で出力されている。これは FPGA の内部で分周したクロックの周波数とパルス密度がほぼ一致しているためだと考えられる。次に図 3(b) は MEMS 触覚センサで物質に触れている時のある状態である。ミキサーからの出力では、うなり成分が計測され触覚センサの抵抗値変化分のパルス密度変化が出力されている。最後に従来のアナログ方式とパルス密度変換によるデジタル回路方式の比較をおこなった。配線規模に関しては従来のアナログ方式では 1 センサの 3 カンチレバーにつき 17 本の線が出力されていたが、デジタル方式では発振箇所の 2 本の出力でこれが実現できる。次に消費電力に関しては、アナログ方式では 3 カンチレバーにつき 80mW の消費電力であった。デジタル方式では、FPGA で使用している回路のみの消費電力を測定することが困難であるためシミュレーションを行なった。現状の 3 カンチレバーによる消費電力は 96mW であり従来方式より高消費電力となったが、15 カンチレバーでの消費電力は 97mW と将来的に多数のカンチレバーを使用する際には、確実に消費電力の削減が可能であることがわかった。

(2)高速多入力処理可能な FPGA による触覚情報技術

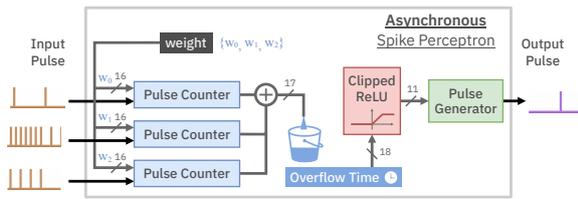
デジタル回路の設計を行うためのハードウェア記述言語「Verilog HDL」を用いて、入出力情報をパルス密度として表現する同期型のハードウェアニューロンである Spike Perceptron の設計を行った。Spike Perceptron は図 4(a)に示すような構造となっており、内部に Pulse Counter、活性化関数である Clipped ReLU、出力パルスを生成する Pulse Generator と学習済みパラメータを持っている。Spike Perceptron にパルスが入力された際の動作を図 4(b) に示す。Spike Perceptron



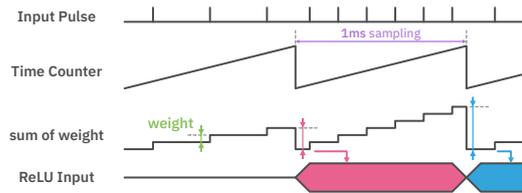
(a) 標準状態でのうなり

(b) 触覚センサ動作時

図 3 触覚センサ動作時



(a) 同期型 Spike Perceptron の構造



(b) タイミングチャート

図 4 同期型 Spike Perceptron の実装

は各入力に対応付いた学習済み重みパラメータを持ち、パルスが入力される毎に後段のカウンタへ加算していく。加算されたカウンタ値の和は、1ms のサンプリング期間ごとに後段の活性化関数へ渡され、その結果を Pulse Generator がパルス密度に変換しパルス列として出力する。デジタル回路上の重みパラメータはビット幅が 12bit の符号付き整数、カウンタは 32bit の符号付き整数として設計しており、活性化関数を通した結果が符号なし 9bit 幅整数に収まるよう最大値が決まった Clipped ReLU となっている。通常のパーセプトロンでは入力値に重みパラメータを乗算するが、Spike Perceptron では入力がパルス密度となるため、重みをパルス毎に加算することが乗算演算に相当する。そのためデジタル回路上に乗算機を構成する必要がなくなり、結果として回路規模の縮小にもつながる。

Spike Perceptron は入出力情報がパルス密度で表されるが、入力値に対する演算は通常のパーセプトロンと同様に線形変換と活性化関数を通して出力値が決定される。そこで、実際に Spike Perceptron を用いて多層構造のニューラルネットワークを FPGA 上に構成し、既存のソフトウェア機械学習資源によって学習したパラメータを適応した場合でも正しく動作するかを確認した。課題としては、典型的な非線形課題である XOR 演算を取り上げた。動作検証としてプロトタイプへ接続された触覚センサに外力を与えた際、パルス密度が変化していることを確認するため、オシロスコープを用いて入出力波形の観測を行った。その結果、図 5 のように入力の状態に対応した XOR 信号が正しく出力されていることが確認できた。

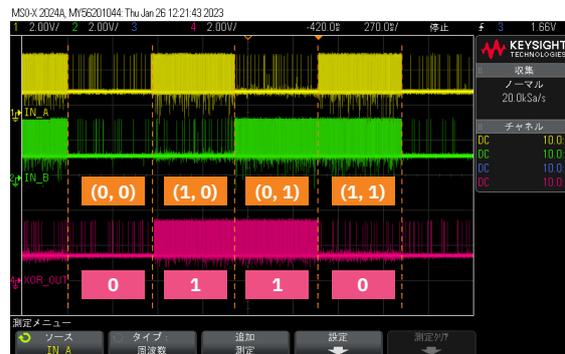


図 5 XOR 演算の実装結果

以上の様に、我々はこの研究開発を通してヒトを模した触覚情報処理システムを実現し、ヒトの触覚認識との特性比較からヒトの触覚の解明と人工触覚の応用を最終的な研究目標とした。その萌芽研究成果として、リアルタイム触覚情報処理のためのハードウェアによる機械学習の基礎開発に向けて、MEMS 触覚センサからの信号をデジタル回路によりパルス密度出力する技術と、ニューラルネットによる非線形信号処理の可能性を実証した。そして、この成果を以降の本格研究に繋げることを目標とする。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 河内彪博, 岡田一志, 大井翔, 松村耕平, 寒川雅之, 野間春生
2. 発表標題 MEMS 触覚センサによる運動時の 靴底にかかる力の計測
3. 学会等名 インタラクシオン2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 河内 彪博、安藤 潤人、野間 春生、寒川 雅之
2. 発表標題 MEMS 触覚センサの校正処理手法の実装と評価
3. 学会等名 電気学会令和3年度E部門総合研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 東山篤規、野間春生
2. 発表標題 両手を圧擦することによって生じる触覚の次元 ALSCALを用いて
3. 学会等名 関西心理学会第132回大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 青木雅典, 土橋嬉真花, 安藤潤人, 寒川雅之, 秋田純一, 野間春生
2. 発表標題 MEMS 触覚センサ向け機械学習のためのFPGA によるSNN パーセプトロン実装
3. 学会等名 第26回バーチャルリアリティ学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 坪倉奏太, 柴田結衣, 安藤潤, 寒川雅之, 渡邊淳司, 野間春生
2. 発表標題 MEMS触覚センサを用いたフォークによる食材刺突時の把持力に基づく食材判別
3. 学会等名 第26回バーチャルリアリティ学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 野間 春生
2. 発表標題 人を超える超小形触覚センサの開発と産業応用
3. 学会等名 けいはんな共創の森イノベーション
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 坪倉 奏太, 安藤 潤人, 北野 勝則, 野間 春生, 寒川 雅之, 秋田 純一
2. 発表標題 MEMS 触覚センサを用いフォークの把持力に基づく食材判別へのリザーブコンピューティングの応用
3. 学会等名 ハプティクス研究委員会第28回研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 齋藤 竜也, 青木雅典, 安藤潤人, 寒川雅之, 秋田純一, 野間春生
2. 発表標題 FPGAを用いたMEMS触覚センサのためのパルス密度変換器の開発
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 船橋 佑, 安藤潤人, 野間春生
2. 発表標題 科学的トレーニングのための足裏にかかる荷重計測システムの開発
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野間 春生
2. 発表標題 ヒトを模して、ヒトに迫る、MEMS触覚センサについて
3. 学会等名 第218回センシング技術応用研究会定例研究例会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野間 春生、東輝明
2. 発表標題 触れるためのセンシング技術:触覚センサの研究と実用化
3. 学会等名 2022 年度第2回ナノメカニクス研究会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masanori Aoki, Tatsuya Saito, Mitsuhiro Ando, Masayuki Sohawa, Tomonori Izumi, Junichi Akita, Haruo Noma
2. 発表標題 FPGA-Based Asynchronous Spike Perceptron for Tiny MEMS Tactile Sensors
3. 学会等名 Transducers 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年～2024年

1. 発表者名 Masanori Aoki, Sota Tsubokura, Mitsuhito Ando, Masayuki Sohgawa, Junichi Akita, Haruo Noma
2. 発表標題 FPGA Implementation of Spiking-MLP for MEMS Tactile Sensors
3. 学会等名 AsiaHaprics 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年～2023年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 野間 春生、寒川 雅之	4. 発行年 2021年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 576
3. 書名 VR/AR/MR技術の最新動向と応用事例	

1. 著者名 野間 春生	4. 発行年 2022年
2. 出版社 シーエムシー出版	5. 総ページ数 340
3. 書名 ハプティクスとその応用 力触覚の伝送・記録・再現・表示	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	秋田 純一 (Akita Jyunichi) (10303265)	金沢大学・電子情報通信学系・教授 (13301)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	大井 翔 (Ooi Sho) (40824636)	大阪工業大学・情報科学部・講師 (34406)	
研究分担者	松村 耕平 (Matsumura Kohei) (80629600)	立命館大学・情報理工学部・准教授 (34315)	
研究分担者	安藤 潤人 (Ando Mitsuhiro) (50899797)	立命館大学・情報理工学部・助教 (34315)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関