

令和元年6月3日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K12494

研究課題名(和文) 超並列ストカスティック演算に基づく大規模な人間の視覚処理ハードウェア実現への挑戦

研究課題名(英文) Brainware Large-Scale Vision Hardware Based on Parallel Stochastic Computing

研究代表者

鬼沢 直哉 (ONIZAWA, Naoya)

東北大学・電気通信研究所・助教

研究者番号：90551557

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：近年、脳機能を模倣した脳型情報処理は、特定のタスクにおいて人間の能力を凌駕するなど、飛躍的に発展している。一方で、人間のようにタスクや環境に応じて処理の内容を変更することは困難であり、予め学習させた特定のタスクしか処理できない問題が存在する。本研究では汎用的な視覚処理システムの実現を目指して、脳機能と同様に非常に多様な特徴抽出処理を可能にするハードウェアフィルタを実現した。特に、その実現方法として脳の神経細胞の振る舞いに近い確率的演算であるストカスティック演算を活用することで、従来ハードウェアと比較して、同等スループットを保ちつつ最大97%の電力削減に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題で実現した人間の視覚処理ハードウェアは、人間の脳のように幅広いパターン(1000万パターン以上)の特徴を抽出することが出来る。この特徴データを用いることで、将来的には汎用的な脳型処理・人工知能実現に繋がるものと考えられる。というのも、現在実現されている人工知能(一般的にニューラルネットワーク)は、特徴をタスクに応じて絞っているために、処理の汎用性が失われていると考えられる。つまり将来、汎用人工知能実現に向けて、本研究課題で実現したハードウェアは、その初期段階の処理に当たる部分が実現されたものと考えられ、学術的に重要な意義を有する。

研究成果の概要(英文)：Recently, brain-inspired vision processing provides better accuracy than human beings in specific applications. However, the current brain-inspired computing works well in only one application previously trained, and hence is lack of flexibility in unknown various applications, unlike human beings.

In this study, a brain-inspired vision-processing filter is realized that can extract millions of different features, like human beings. In addition, as the hardware is implemented using stochastic computing that exhibits a similar behavior to human neurons, the power dissipation is reduced by 97% while maintaining the throughput in comparison with a traditional binary implementation.

研究分野：計算機科学

キーワード：ソフトコンピューティング 確率的演算

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

視覚情報からの物体認識処理は、これまでネオコグニトロン (Fukushima, et al., 1982), HMAX (Riesenhuber, et al., 1999), Deep convolutional neural network (Hinton, et al., 2006) など様々なものが提案されてきたが、そのほとんどが Hubel and Wiesel による Simple cell (1959) と Complex cell (1962) モデルをベースとしている。その中で HMAX は V1 (第一次視覚野) での処理がガボールフィルタに近似できるという生理学実験での結果を元にしたモデルであり、V1 に対応する低層での処理を hard-wired で実現し、物体認識を行う高層での処理は学習により実現する。しかしながら、この HMAX モデルにおける V1 の処理は計算コストの関係上、人間のように幅広い空間周波数及び角度成分を抽出することが難しい。その原因は大きく 2 つあり、ガボール関数が複雑なため、予め計算をしておきメモリに保存する必要があるため、フィルタのパターン数に比例して必要メモリ容量が膨大になる、フィルタ演算である畳み込み演算は、多数の乗算器が必要 (例: 11x11 のフィルタで 121 個の乗算器) なため、ハードウェア量が膨大になる、という点である。

2. 研究の目的

本研究課題では、人間的視覚情報処理ハードウェアを実現するために、確率的演算の一種であるストカスティック演算を活用する。本申請者は、ストカスティック演算を用いることで、ガボールフィルタ等の非線形演算をコンパクトにハードウェア実現できることを発見し、他に先駆けて公表した (N. Onizawa, et al., IEEE Signal Processing Letters, 22-9, 1224/1228, 2015)。この技術をベースに、本研究期間内に以下のことを明らかにする: (a) 従来メモリベース方式と比較して、コンパクトかつ柔軟なガボールフィルタ演算回路の実現、(b) 従来 HMAX と比較して高い認識能力の実現。

3. 研究の方法

(1) 初年度である H28 年度は、大規模な人間的視覚処理ハードウェアを実現するために、脳の V1 領域での特徴抽出処理 (2 次元ガボールフィルタ) をストカスティック演算で実現する計算アルゴリズムの考案を行った。本研究代表者によってすでに考案されている、1 次元ガボールフィルタのアルゴリズムを拡張させることで、2 次元ガボールフィルタのアルゴリズムを実現した。実現するにあたり、従来のアルゴリズムでは空間周波数等いくつかのパラメータが固定となっていたが、人間のような幅広い空間周波数成分を抽出するために、パラメータの可変性を行った。つまり、提案のアルゴリズムでは、ハードウェア実装後に動的にガボールフィルタの特性を変化させることを可能にした。

2 年度である H29 年度では、大規模な人間的視覚処理ハードウェアを実現するために、昨年度考案した脳の V1 領域での特徴抽出処理 (2 次元ガボールフィルタ) の計算アルゴリズムのハードウェア実装を行った。ストカスティック演算を活用した提案アルゴリズムを Taiwan Semiconductor Manufacturing Company (TSMC) 65nm CMOS プロセスにおいてハードウェア設計・シミュレーションを行い、従来方式からの有効性の検証を行った。ハードウェアの設計としては、ハードウェア記述言語である Verilog HDL を用いて提案回路 (図 1) を設計し、Synopsys 社 Design Compiler による論理合成、Cadence 社 Innovus による配置配線を行うことでチップレイアウトを生成することで、性能評価を行った。

最終年度である H30 年度では、昨年度から前倒しで行っている人間的視覚処理の一種である HMAX モデル (図 2) のハードウェア実装を完了させ、従来方式との性能比較を行うことで提案方式の有用性を示した。具体的には、HMAX モデルの第 1 層目である特徴抽出処理を、提案のストカスティック演算に基づくガボールフィルタで実現し、従来のバイナリ演算との性能比較を行った。性能比較としては、HMAX の物体認識精度とともにハードウェアの性能 (速度・電力) 比較を行った。

(2) 上記の提案フィルタアルゴリズム・ハードウェア実装と同時に、提案フィルタと入力信

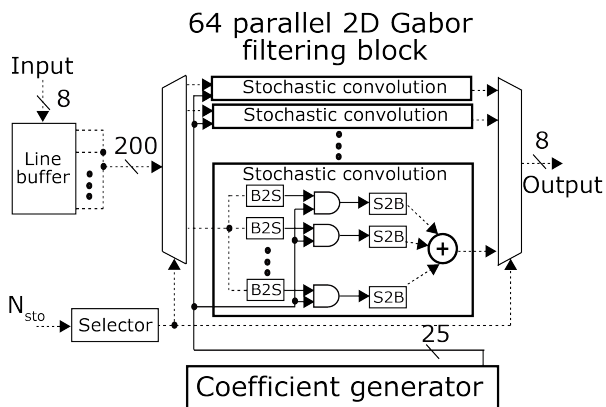


図 1 ストカスティック演算に基づく可変型 2 次元ガボールフィルタのハードウェアアーキテクチャ

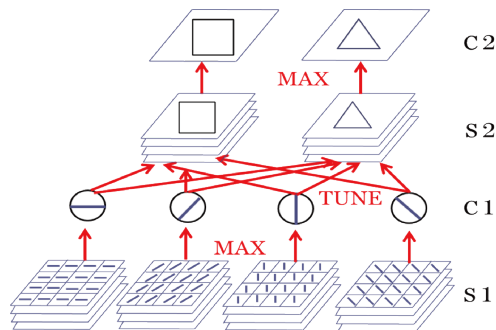


図 2 HMAX による物体認識処理

号(画像)との間で行われる畳み込み演算(乗算+加算)のハードウェア化にも取り組んだ。ストカスティック演算では、加算がマルチプレクサのみでできるため、小規模な回路実現が可能になるが、入力数の増加に伴って演算精度が大幅に低下する問題が存在した。この問題を解決するために、加算を指数関数軸で行うことで、加算を乗算に置き換えるハードウェアアルゴリズムを考案した。図3は提案アルゴリズムに基づくハードウェアを示しており、ストカスティック乗算(AND素子で実現)の後、指数関数の軸に変換を行ったあと乗算を行い、最後に元の軸に戻すことで畳み込み演算を実現している。

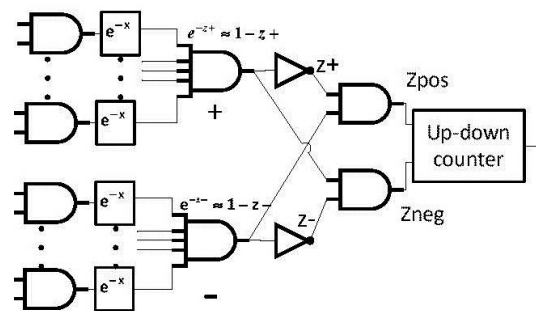


図3 加算を指数関数軸で行う、ストカスティック演算に基づく畳み込み演算器

4. 研究成果

(1) 28年度の研究成果として、提案の可変ガボールフィルタを従来手法の一つであるCORDICを用いたハードウェアとの性能比較を行った。従来手法では、提案と同様にフィルタの特性を可変可能だが、計算量が多くハードウェア規模が大きくなってしまい、結果としてスループットが低下してしまう問題があった。これに対して、提案ストカスティック可変ガボールフィルタは、ストカスティック演算を活用することで、小規模なハードウェア実現が可能となっただけでなく、フィルタサイズの柔軟さを兼ね備えつつ、一桁以上のスループットの向上が可能となった。図4に示すように提案フィルタでは、所望の空間周波数および角度情報に応じてリアルタイムにフィルタ特性を変更可能であり、この研究成果は欧州最大の半導体国際学会 ESSCIRC2017に採択となった。

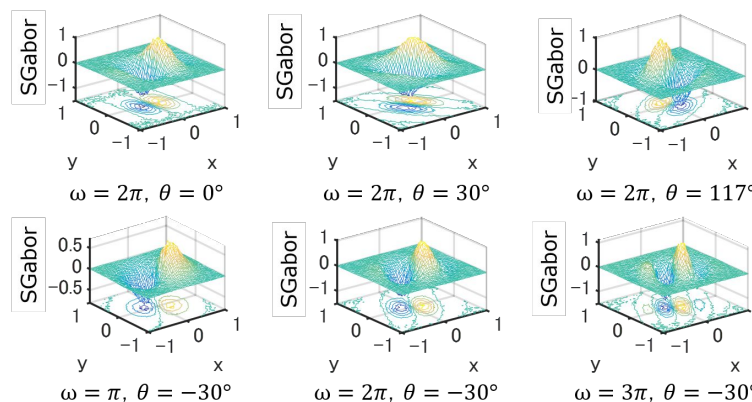


図4 ストカスティック演算に基づく提案ガボールフィルタの特性の可変化の例(空間周波数と角度成分を変化)

また、HMAXの物体認識処理において、従来のバイナリ実現と比較して、同等認識精度かつ同等スループットを保ちつつ、最大97%の電力削減に成功した。このような大幅な電力削減は、ストカスティック演算によるガボールフィルタの係数をフィルタ演算時にのみリアルタイム

に生成することで、メモリ不要の構造を実現した結果である。この研究成果は、分野最高峰の論文誌であるIEEEのJETCAS(vol. 8, no. 3, pp. 444-453, Sep. 2018)に採録となった。

(2) ストカスティック演算による提案の畳み込み演算器では、従来のように入力数が増加しても演算精度が低下しないことがシミュレーションにより確認され、提案ガボールフィルタが入力数に依存せずに畳み込み演算が可能となった。この研究成果は、学術論文誌 Journal of Signal Processing Systems(vol. 90, no. 5, pp. 709-725, May 2018)に採録となった。このように、入力数に依存せずにストカスティック加算を高い精度で実現する手法は、今回対象とした人間的視覚処理への応用に留まらず、ストカスティック演算を用いたハードウェアすべてに適用可能な汎用的なものであるため、その成果は学術的に非常に重要であるといえる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計12件)

Application of Stochastic Computing in Brainware
Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE, vol. E9-N, no. 4, pp. 406-422, Oct. 2018 (invited)

W. J. Gross, N. Onizawa, K. Matsumiya, and T. Hanyu
 DOI: 10.1587/nolta.9.406

An Accuracy/Energy-Flexible Configurable Gabor-Filter Chip Based on Stochastic Computation with Dynamic Voltage-Frequency-Length Scaling
IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, vol. 8, no. 3, pp. 444-453, Sep. 2018 (査読有)

N. Onizawa, D. Katagiri, K. Matsumiya, W. J. Gross, and T. Hanyu
 DOI: 10.1109/JETCAS.2018.2844329

A Generalized Stochastic Implementation of the Disparity Energy Model for Depth Perception

Journal of Signal Processing Systems, vol. 90, no. 5, pp. 709-725, May 2018 (査読有)
K. Boga, F. Leduc-Primeau, N. Onizawa, K. Matsumiya, T. Hanyu, and W. J. Gross
DOI: 10.1007/s11265-016-1197-3

VLSI Implementation of Deep Neural Networks Using Integral Stochastic Computing
IEEE Trans. on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, vol. 25, no. 10, pp. 2688-2699,
Oct. 2017 (査読有)

A. Ardakani, F. Leduc-Primeau, N. Onizawa, T. Hanyu, and W. J. Gross
DOI: 10.1109/TVLSI.2017.2654298

Area/Energy-Efficient Gammatone Filters Based on Stochastic Computation
IEEE Trans. on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, vol. 25, no. 10, pp. 2724-2735,
Oct. 2017 (査読有)

N. Onizawa, S. Koshita, S. Sakamoto, M. Abe, M. Kawamata, and T. Hanyu
DOI: 10.1109/TVLSI.2017.2687404

ストカスティック演算に基づく省エネルギー脳型 LSI 設計技術
IEICE Fundamental Review, vol. 11, no.1, pp. 28-39, July 2017 (解説論文)

鬼沢直哉, 松宮一道, 羽生貴弘
DOI: 10.1587/essfr.11.1_28

Analog-to-Stochastic Converter Using Magnetic Tunnel Junction Devices for Vision Chips
IEEE Trans. on Nanotechnology vol. 15, no. 5, pp. 705-714, Sept. 2016 (査読有)

N. Onizawa, D. Katagiri, W. J. Gross, and T. Hanyu
DOI: 10.1109/TNANO.2015.2511151

[学会発表](計 19 件)

Stochastic Computing for Brainware LSI
The 2019 RIKEN International Workshop on Neuromorphic Computing, Mar. 2019 (invited)
N. Onizawa

確率的演算に基づく省エネルギー脳型 LSI 実現の展望
2018 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2018 年 9 月 (依頼講演)

鬼沢直哉
High-Precision Stochastic State-Space Digital Filters Based on Minimum Roundoff Noise Structure
Proc. IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS) 2018, pp. 1-5, May 2018

S. Koshita, N. Onizawa, M. Abe, T. Hanyu, and M. Kawamata
Energy-Efficient Brainware LSI Based on Stochastic Computation
2018 Emerging Technologies CMOS (ETCMOS), May 2018 (invited)

N. Onizawa
Energy-Efficient Brainware LSI Based on Stochastic Computation
5th IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP), Nov. 2017 (invited)

N. Onizawa
Accuracy/Energy-Flexible Stochastic Configurable 2D Gabor Filter with Instant-on Capability
Proc. 43rd European Solid-State Circuit Conference (ESSCIRC), pp. 43-46, Sept. 2017

N. Onizawa, K. Matsumiya, W. J. Gross, and T. Hanyu
ストカスティック演算に基づく省面積・省エネルギー脳型 LSI 実現
2017 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, AS-1-1, p. S-1, 2017 年 9 月 (依頼講演)

鬼沢直哉, 松宮一道, 羽生 貴弘
ストカスティック演算に基づく省エネルギー脳型 LSI 実現の展望
第 30 回回路とシステムのワークショップ, 2017 年 5 月 (招待講演)

鬼沢直哉, 松宮一道, 羽生 貴弘
Realization of FIR Digital Filters Based on Stochastic/Binary Hybrid Computation
Stochastic Implementation of Gammatone Filters for Auditory Processing
1st Workshop on Stochastic Computing and Related Topics, June 2016 (invited)

N. Onizawa

[図書](計 1 件)

Brain-Inspired Computing
Chapter 9 in Book: *Stochastic Computing: Techniques and Applications*, pp. 185-199,
Editors: V. C. Gaudet and W. J. Gross, Springer, ISBN: 978-3-030-03729-1, 2019
N. Onizawa, W. J. Gross and T. Hanyu

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。