

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 4 月 11 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26730001

研究課題名(和文) エネルギーを制限したしきい値回路の計算限界の解明

研究課題名(英文) Elucidation of computational limit of threshold circuit with restricted energy

研究代表者

鈴木 顕 (SUZUKI, Akira)

東北大学・情報科学研究科・助教

研究者番号：10723562

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究で得られた結果は大きく以下の2つである。

【結果1：一般化対称関数全てを計算することのできるエネルギー効率のよいしきい値回路の構成】本研究で与えた構成は、従来知られていたものに比べ、回路の規模が指数的に小さいものになっている。

【結果2：与えた構成の最適性の証明】この結果によって、エネルギーが小さい場合の結果1で与えた構成は、これ以上よくすることのできない最適な構成であることを示すことに成功した。

研究成果の概要(英文)：The main results of this research are the following two:

Result 1. We give the constructions of energy-efficient threshold circuits computing generalized symmetric functions. In addition, our constructions improve the size of threshold circuit exponentially, compared with known ones.

Result 2. We show the optimality of our constructions. By this result, we show that the construction we give in Result 1 is optimal, that is, no one can construct with smaller number of gates than our construction.

研究分野：アルゴリズム論

キーワード：エネルギー複雑度 しきい値回路 トレードオフ

1. 研究開始当初の背景

本研究では、しきい値回路の回路計算量、すなわち計算能力について研究を行う。しきい値回路は脳内の神経回路網を電子回路にモデル化したものであり、回路計算量理論の分野から脳の仕組みの解明を目指す足がかりとして、多くの研究がされている。我々の脳内では、神経回路網が複雑な計算を行っているが、その神経回路は現在の電子回路に比べ、高速であり、コンパクトであり、消費エネルギーが小さいことが知られている。これらのことから、脳の仕組みに倣った電子回路が構成できれば、電子回路の性能は劇的に進歩すると考えられており、国内外で脳の仕組みの解明について多くの研究がされている。実際、2013年7月、Neftciらは神経回路網と似た動作を行う電子回路の開発に成功した[1]。一方で、実際の脳内で神経回路網がどのように接続され、どのような情報をやり取りすることで計算を行っているかについては明らかになっておらず、どのような回路構成によって高速、コンパクト、低消費エネルギーを実現しているかはわかっていない。これを明らかにするために、神経回路網を電子回路にモデル化し、回路計算量理論の分野で培われてきた解析技術を用いて解明しようというアプローチが、計算機科学の観点から多くされている。

[1] E. Neftci, J. Binas, U. Rutishauser, E. Chicca, G. Indiveri, R. J. Douglas, "Synthesizing cognition in neuromorphic electronic systems," Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS), July 22, 2013.

2. 研究の目的

本研究では、神経回路の特徴の中でも特にエネルギー消費に着目し、エネルギーを制限したしきい値回路の構成の限界を数学的に解明することを目指す。

しきい値回路とは、しきい値素子からな

る組合せ回路である。詳細な定義は省略するが、しきい値素子はそれぞれ入力のみとしきい値を持っており、その値をうまく与えることで、1つの素子でANDやOR、NOT素子と同様の動作もできる。

申請者はこれまでに、神経回路網のモデルであるしきい値回路に関する研究を行ってきた。具体的には、パリティ関数、対称関数などの一般的によく知られた関数や、PnLR関数というパターン認識に関する関数など、個別の関数に対して、エネルギー効率の良いしきい値回路の構成を行い、エネルギーを制限した際にしきい値回路の計算能力にどのような影響が出るのかについて明らかにしてきた。それらの研究の中で、どちらかという計算機に近いパリティ関数と、生体に近いPnLR関数という、2つのまったく異なる関数に対して、エネルギーと素子数の間に似た関係があることを示した。具体的には、エネルギーを小さくしようとすると素子数が大きくなってしまい、素子数を小さくしようとすると今度はエネルギーが大きくなってしまふというトレードオフの関係を示した。さらにその素子数とエネルギーの関係を示す式は、全く異なる関数であるにもかかわらず、ほぼ同じ曲線を描くことがわかった。このことから申請者は、他の関数でも同じような関係(以下、トレードオフの関係)を持つものがあるのではないかという着想を得た。しかし、ある特定の関数に着目し、その関数の特徴について研究を行う従来の研究手法では、1つの研究で1つの関数に対するトレードオフの関係しか明らかにすることができなかった。そこで本研究では、「このような性質をもった関数ならば、どのような関数でもトレードオフの関係を満たす」という十分条件を与えることを目指し、より多くの関数に対してトレードオフの関係があることを明らかにする。

3. 研究の方法

より多くの関数に対して、トレードオフの関係が成り立つことを示すために、具体的には次の3つの目標を掲げる。

目標 1. 既知の結果を一般化した関数に対するトレードオフを明らかにする。

目標 1-1. GIP 関数に対してトレードオフの関係が成り立つことを示す。

目標 1-2. PnD 関数に対してトレードオフの関係が成り立つことを示す。

目標 2. 足し算を計算する関数に対するトレードオフを明らかにする。

目標 3. トレードオフの関係が成り立つ関数の十分条件を与える。

本研究の主目標は、もちろん目標 3 である。それを達成する足がかりとして、目標 1 と目標 2 を設定した。目標 1 で扱う2つの関数は、これまでにトレードオフの関係が知られていたパリティ関数と PnLR 関数をそれぞれ一般化した関数であり、より複雑な関数である。目標 2 で扱う足し算関数は、これまでに申請者が研究してきたどの関数とも異なる関数である。もしこれらの関数に対しても同じトレードオフの関係があった場合、そこから共通項を導き出すことで、目標 3 の達成を図る。

4. 研究成果

本研究で得られた結果は大きく以下の2つである。

結果 1 : 一般化対称関数全てを計算することのできるエネルギー効率のよいしきい値回路の構成

本研究で与えた構成は、従来知られていたものに比べ、回路の規模が指数的に小さいものになっている。しきい値回路は一般にエネルギーを制限すると回路の規模が大きくなってしまおうというトレードオフの関係が成り立つ場合が多いが、本研究では、許

されるエネルギーの量に応じて、適切な構成を与えることにより、どのようなエネルギー量の場合にも使うことのできる結果を与えることができた。さらに、後述する結果 2 によって、エネルギーが小さい場合の結果 1 で与えた構成は、これ以上よくすることのできない最適な構成であることを示すことに成功した。

結果 2 : 与えた構成の最適性の証明

結果 2 では、従来よく知られていた「素子削減法」や「通信複雑度」とは全く異なる新しい証明手法を提案することもできた。この手法は、今回結果 1 で考慮した一般化対称関数だけでなく、この世に存在するすべての関数に対して適用することのできる、極めて汎用性の高い手法となっている。すなわち、どのような関数であっても、この手法を適用することで構成可能なしきい値回路の規模の下界を得ることができる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 7 件)

- [1] Takashi Horiyama, Takehiro Ito, Keita Nakatsuka, Akira Suzuki and Ryuhei Uehara, Complexity of tiling a polygon with trominoes or bars, Discrete & Computational Geometry (DCG), to appear.
- [2] Akira Suzuki, Masashi Kiyomi, Yota Otachi, Kei Uchizawa and Takeaki Uno, Hitori numbers, Journal of Information Processing (JIP), to appear.
- [3] Amer E. Mouawad, Naomi Nishimura, Venkatesh Raman, Narges Simjour and Akira Suzuki, On the parameterized complexity of reconfiguration problems, Algorithmica, Vol. 78, Issue 1, pp. 274-297, May 2017. DOI: 10.1007/s00453-016-0159-2
- [4] Akira Suzuki, Amer E. Mouawad and Naomi Nishimura, Reconfiguration of dominating sets, Journal of Combinatorial Optimization (JOCO), Vol. 32, Issue 4, pp. 1182-1195,

November 2016.

DOI: 10.1007/s10878-015-9947-x

- [5] Arash Haddadan, Takehiro Ito, Amer E. Mouawad, Naomi Nishimura, Hirotaka Ono, Akira Suzuki and Youcef Tebbal, The complexity of dominating set reconfiguration, Theoretical Computer Science (TCS), Vol. 651, Issue C, pp. 37-49, October 2016.
DOI: 10.1016/j.tcs.2016.08.016
- [6] Katsuhisa Yamanaka, Erik D. Demaine, Takehiro Ito, Jun Kawahara, Masashi Kiyomi, Yoshio Okamoto, Toshiki Saitoh, Akira Suzuki, Kei Uchizawa and Takeaki Uno, Swapping labeled tokens on graphs, Theoretical Computer Science (TCS), Vol. 586, Issue C, pp. 81-94, June 2015.
DOI: 10.1016/j.tcs.2015.01.052
- [7] Takashi Hasegawa, Takehiro Ito, Akira Suzuki and Xiao Zhou, Experimental evaluations of dynamic algorithm for maintaining shortest-paths trees on real-world networks, Interdisciplinary Information Sciences (IIS), Vol. 21, No. 1, pp. 25-36, March 2015.
DOI: 10.4036/iis.2015.25

〔学会発表〕(計 20 件)

- [1] Katsuhisa Yamanaka, Erik D. Demaine, Takashi Horiyama, Akitoshi Kawamura, Shin-Ichi Nakano, Yoshio Okamoto, Toshiki Saitoh, Akira Suzuki, Ryuhei Uehara and Takeaki Uno, Sequentially swapping colored tokens on graphs, Proceedings of the 11th International Conference and Workshops on Algorithms and Computation (WALCOM 2017), Lecture Notes in Computer Science (LNCS), Vol. 10167, pp. 435-447, 2017.
2017年3月31日 新竹市(台湾)
- [2] Hiroki Osawa, Akira Suzuki, Takehiro Ito and Xiao Zhou, The complexity of (list) edge-coloring reconfiguration problem, Proceedings of the 11th International Conference and Workshops on Algorithms and Computation (WALCOM 2017), Lecture Notes in Computer Science (LNCS), Vol. 10167, pp. 347-358, 2017.
2017年3月30日 新竹市(台湾)

- [3] Takehiro Ito, Yota Otachi, Toshiki Saitoh, Hisayuki Satoh, Akira Suzuki, Kei Uchizawa, Ryuhei Uehara, Katsuhisa Yamanaka and Xiao Zhou, Competitive diffusion on weighted graphs, Proceedings of the 14th Algorithms and Data Structures Symposium (WADS 2015), Lecture Notes in Computer Science (LNCS), Vol. 9214, pp. 422-433, 2015.
2015年8月6日 ビクトリア(カナダ)
- [4] Arash Haddadan, Takehiro Ito, Amer E. Mouawad, Naomi Nishimura, Hirotaka Ono, Akira Suzuki and Youcef Tebbal, The complexity of dominating set reconfiguration, Proceedings of the 14th Algorithms and Data Structures Symposium (WADS 2015), Lecture Notes in Computer Science (LNCS), Vol. 9214, pp. 398-409, 2015.
2015年8月5日 ビクトリア(カナダ)
- [5] Akira Suzuki, Amer E. Mouawad and Naomi Nishimura, Reconfiguration of dominating sets, Proceedings of the 20th International Computing and Combinatorics Conference (COCOON 2014), Lecture Notes in Computer Science (LNCS), Vol. 8591, pp. 405-416, 2014.
2014年8月5日 アトランタ(アメリカ)

- [6] Katsuhisa Yamanaka, Erik D. Demaine, Takehiro Ito, Jun Kawahara, Masashi Kiyomi, Yoshio Okamoto, Toshiki Saitoh, Akira Suzuki, Kei Uchizawa and Takeaki Uno, Swapping labeled tokens on graphs, Proceedings of the 7th International Conference on FUN with Algorithms (FUN 2014), Lecture Notes in Computer Science (LNCS), Vol. 8496, pp. 364-375, 2014.
2014年7月2日 リーパリ島(イタリア)

〔その他〕
ホームページ等
Akira Suzuki's Web Site
<http://www.ecei.tohoku.ac.jp/alg/suzuk/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 顕 (SUZUKI, Akira)

東北大学・大学院情報科学研究科・助教
研究者番号：10723562