

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420352

研究課題名(和文) Polar符号の発展とその復号法設計による有限符号長の復号誤り率の改善と性能解析

研究課題名(英文) A study on Polar codes to improve the performance of coding error rate

研究代表者

岩田 賢一 (Iwata, Ken-ichi)

福井大学・学術研究院工学系部門・准教授

研究者番号：80284313

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：Arikanにより提案された polar 符号は、通信の信頼性のために提案された誤り訂正符号の一つである。今後、新たな中核の一つをなすと期待される符号である。本研究では、polar符号の研究を主に次の3点について行った。A) polar符号の有限長での性能解析と性能改善を目指して、対象通信路容量と復号誤りの信頼性関数の関係に関する解析。B) polar符号の符号構成法の改良に関して、離散通信路に対する量子化アルゴリズムに関する改良と高速化。C) q-polar符号に関する多段分極に関する性能解析。

研究成果の概要(英文)：Polar coding, which has been introduced by Arikan, is a channel coding scheme for reliable communication. Polar coding is expected to be one of the new core technique of efficient communication in the future. In this research project, we mainly studied the polar code about the following three subjects: (A) an analysis of the relationship between symmetric channel capacity and reliability function of the channel model, (B) Improvement and speedup on quantization algorithm for discrete channel model used in polar code design, (C) an analysis of the multilevel polarization of the q-ary polar coding.

研究分野：情報理論

キーワード：情報理論 通信路符号 polar符号 通信路出力量子化

1. 研究開始当初の背景

情報理論と符号理論はデジタル情報伝送の信頼性を確保するために必要不可欠な基礎理論であり、現在の情報化社会の大きな基盤を支えている。伝送する情報を与えられた通信路を通して任意に小さな復号誤り確率で受信者に送る符号を考えるならば、通信路容量に対して任意に近い符号化率を達成するランダム符号の存在がシャノン[1]により示されている。それゆえ、シャノンが示した通信路符号化定理の理論限界に迫る符号の符号化と復号法における計算複雑度およびその構成方法の計算複雑度について多くの議論がなされている。

2009年に Arıkan が提案した polar 符号[2]は、符号化および復号における計算複雑度が符号長 n に対して、 $O(n \log n)$ であり、任意に小さな復号誤り確率を達成するとともに符号化効率が理論限界である通信路容量を符号長とともに漸近的に達成する符号である。しかしながら、Arıkan の参考文献[2]では、符号長に対して指数関数時間の計算複雑度を要する符号構成法の改善が課題として残された。これに対して、Tal と Vardy は polar 符号の符号構成法に関して、参考文献[3]により一つの有効な構成方法を与えた。また、有限長の符号長における実用的な Polar 符号の有効性に関しては、研究開始当初の頃、明確かつ決定的な性能評価がなされていなかった。

2. 研究の目的

本研究では、polar 符号の更なる発展が研究の目的であり、本研究では、次の3点[A]から[C]を本研究の主な目的とした。

[A] polar 符号の有限長での性能解析と性能改善を目指して、対称通信路容量と復号誤りの信頼性関数の関係に関する解析。

[B] polar 符号の符号構成法の改良に関して、離散無記憶通信路の出力に対する量子化アルゴリズムに関する改良と高速化。

[C] q 元 polar 符号に関する多段分極に関する性能解析。

これら研究の目的の[A]から[C]に関連する研究を行うことで、polar 符号の有限長の符号長における有効性に関する改良と性能評価を行う。

3. 研究の方法

研究の目的で述べた[A]に関しては、polar 符号の有限符号長での性能解析の準備として、まずは、3元入力通信路に対する Gallager の信頼性関数による評価を行い、さらに、3元入力通信路から一般の q 元入力通信路への拡張を行った。有限符号長での性能解析において、Gallager の信頼性関数による評価を行うにあたり、条件付き Rényi エントロピーを用いた性能解析の重要性を認

識した。それゆえ、条件付き Rényi エントロピーについて詳細に解析を行った。

研究の目的で述べた[B]に関しては、polar 符号の符号構成法で用いる通信路の出力に対する量子化による通信路モデルの近似アルゴリズムに関する改良と高速化を行った。これまでの近似アルゴリズムの高速化と近似アルゴリズムの最適化の規範として有限符号長の polar 符号における量子化における最適化の規範の検討を目指した。

研究の目的で述べた[C]に関しては、2元 polar 符号から多元への拡張を考える。特に、2元消失通信路の通信路モデルを一般化することで、一般化消失通信路に対する多段分極に基づく多元 polar 符号について polar 変換における通信路モデルに関する簡便な漸近式の導出を考えた。

4. 研究成果

研究の目的の[A]に述べた対称通信路容量と復号誤りの信頼性関数の関係に関する解析として、〔査読付き国際会議〕の[4]と〔学会発表〕の [7],[9],[11]がある。また、これに関連した研究成果として、情報量に関する解析として、〔査読付き国際会議〕の[1],[3]と〔その他、発表論文〕の[1],[3],[4]と〔学会発表〕の [1],[4],[5]がある。

研究の目的の[B]に述べた polar 符号の符号構成法の改良に関して、離散無記憶通信路の出力に対する量子化アルゴリズムに関する改良と高速化に関して、〔査読付き国際会議〕の[5],[6]と〔学会発表〕の[3],[8],[10]がある。

研究の目的の[C]に述べた q 元 polar 符号に関する性能解析とその改良に関する研究成果として、〔査読付き国際会議〕の[2]と〔その他、発表論文〕の[2]と〔学会発表〕の [2],[6]がある。

また、polar 符号の復号に関する研究の発展として、〔学会発表〕の[13]と特許権 1 件がある。

参考文献

- [1] C. E. Shannon, "A mathematical theory for communication," Bell Syst. Tech. J., vol.27, pp.379-423, 623-656, Jul.-Oct. 1948.
- [2] E. Arıkan, "Channel Polarization: A Method for Constructing Capacity-Achieving Codes for Symmetric Binary-Input Memoryless Channels," IEEE Trans. on Information Theory, vol.55, no.7, pp. 3051-3073, Jul. 2009.
- [3] I. Tal, and A. Vardy, "How to construct polar codes," IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 59, no. 10, pp. 6562-6582, Oct. 2013.

5. 主な発表論文等

〔査読付き国際会議〕(計6件)

- [1] Yuta Sakai, Ken-ichi Iwata, "Extremal Relations Between Shannon Entropy and l_1 -Norm," Proceedings of 2016 International Symposium on Information Theory and its Applications (ISITA2016), pp.433-437, October 30-November 2, 2016, Monterey, California, U.S.A.
- [2] Yuta Sakai, Ken-ichi Iwata, "A Generalized Erasure Channel in the Sense of Polarization for Binary Erasure Channels," Proceedings of 2016 IEEE Information Theory Workshop (ITW2106), pp. 399-403, September 11-14, 2016, Cambridge U.K., DOI: 10.1109/ITW.2016.7606864.
- [3] Yuta Sakai, Ken-ichi Iwata, "Relations Between Conditional Shannon Entropy and Expectation of l_1 -Norm," Proceedings of 2016 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT2016), pp.1641-1645, July 10-15, 2016, Barcelona, Spain, DOI: 10.1109/ISIT.2016.7541577.
- [4] Yuta Sakai, Ken-ichi Iwata, "Feasible Regions of Symmetric Capacity and Gallager's E_0 Function for Ternary-Input Discrete Memoryless Channels," Proceedings of 2015 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT2015), pp. 81-85, June 14-19, 2015, Hong Kong, DOI: 10.1109/ISIT.2015.7282421
- [5] Yuta Sakai, Ken-ichi Iwata, "Suboptimal Quantizer Design for Outputs of Discrete Memoryless Channels with a Finite-Input Alphabet," Proceedings of 2014 International Symposium on Information Theory and its Applications (ISITA2014), pp. 120-124, October 26-29, 2014, Melbourne Australia.
- [6] Ken-ichi Iwata, Shin-ya Ozawa, "Quantizer Design for Outputs of Binary-Input Discrete Memoryless Channels Using SMAWK Algorithm," Proceedings of 2014 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT2014), pp. 191-195, June 29-July 4, 2014, Honolulu, Hawaii, U.S.A. DOI: 10.1109/ISIT.2014.6874821.

〔学会発表〕(計13件)

- [1] Yuta Sakai, Ken-ichi Iwata, "A Study on Sharma-Mittal Entropy in Terms of Pseudo-additivity and Aczél-Daróczy Uniqueness Theorem of Rényi Entropy," 第39回情報理論とその応用シンポジウム予稿集, pp.585-590, 2016年12月13-16日, 岐阜県高山市.

[2] 木内智之, 阪井祐太, 岩田賢二, "q元入力一般化消失通信路の多段分極によるPolar符号の構成と符号化および復号化," 電子情報通信学会信学技報(情報理論), IEICE-IT2016-36, pp. 13-18, 2016年9月2日, 佐賀県武雄市.

[3] Yuta Sakai, Ken-ichi Iwata, "Speed-Up Method for Optimal Quantizations of Binary-Input Discrete Memoryless Channels with Monge Property," 電子情報通信学会信学技報(情報理論), IEICE-IT2016-40, pp. 35-40, 2016年9月2日, 佐賀県武雄市.

[4] 阪井祐太, 岩田賢二, "異なる位数での2つの条件付き Rényi エントロピー間の限界式," 電子情報通信学会信学技報(情報理論), IEICE-IT2016-11, pp.63-68, 2016年5月19-20日, 北海道小樽市.

[5] 阪井祐太, 岩田賢二, "条件付き Shannon エントロピーとノルムの期待値との関係とその応用," 電子情報通信学会信学技報(情報理論), IEICE-IT2015-109, pp.49-54, 2016年3月10-11日, 東京都調布市.

[6] 阪井祐太, 岩田賢二, "法qの演算に基づくPolar変換の解析が容易なq元入力離散無記憶通信路," 第38回情報理論とその応用シンポジウム予稿集, pp.589-594, 2015年11月24-27日, 岡山県児島市.

[7] 阪井祐太, 岩田賢二, "一様な入力分布の離散無記憶通信路に対する対称通信路容量と Gallager の E_0 関数の値域," 電子情報通信学会信学技報(情報理論), IEICE-IT2015-2, pp.7-12, 2015年5月21-22日, 京都府京都市.

[8] 永原拓実, 阪井祐太, 岩田賢二, "離散無記憶通信路に対して許容できる相互情報量の条件下で出力記号数を削減するアルゴリズム," 電子情報通信学会信学技報(情報理論), IEICE-IT2014-86, pp.153-158, 2015年3月2-3日, 福岡県北九州市.

[9] 阪井祐太, 岩田賢二, "通信路入力が一様分布の3元入力離散無記憶通信路に対する対称通信路容量と信頼性関数の値域," 電子情報通信学会信学技報(情報理論), IEICE-IT2014-55, pp.7-12, 2015年1月30日, 千葉県柏市.

[10] 永原拓実, 岩田賢二, "デュアルプロセッサによる2元入力離散無記憶通信路の出力の量子化方法," 第37回情報理論とその応用シンポジウム予稿集, pp.542-547, 2014年12月9-12日, 富山県宇奈月市.

[11] 阪井祐太, 岩田賢二, "等しい通信路容量を有する3元入力無記憶対称通信路における信頼性関数の値域," 第37回情報理論とその応用シンポジウム予稿集, pp.656-661, 2014年12月9-12日, 富山県宇奈月市.

[12] 阪井祐太, 岩田賢二, "離散無記憶通信路の出力に対する貪欲法による量子化について," 電子情報通信学会信学技報(情報理論), IEICE-IT2014-34, pp.127-132, 2014年7月17-18日, 兵庫県神戸市.

[13] 岩田賢一, 大島怜也, “原始 BCH 符号の並列シンドローム計算におけるある種の方法,” 電子情報通信学会信学技報(情報理論), IEICE-IT2014-5, pp.23-26, 2014 年 5 月 16 日, 大分県別府市.

〔産業財産権〕

取得状況(計 1 件)

名称: 演算回路設定方法

発明者: 岩田賢一, 福間慎治, 大島怜也

権利者: 国立大学法人福井大学

種類: 特許権

番号: 特許第 5999634 号

取得年月日: 平成 28 年 9 月 28 日

国内外の別: 国内

〔その他, 発表論文〕

[1] Yuta Sakai, Ken-ichi Iwata, “Sharp Bounds Between Two Rényi Entropies of Distinct Positive Orders,” arXiv, May, 2016, 33 pages, available from <https://arxiv.org/abs/1605.00019>.

[2] Yuta Sakai, Ken-ichi Iwata, “A Generalized Erasure Channel in the Sense of Polarization for Binary Erasure Channels” arXiv, 27 pages, April, 2016, available from <https://arxiv.org/abs/1604.04413>.

[3] Yuta Sakai, Ken-ichi Iwata, “Relations Between Conditional Shannon Entropy and Expectation of ℓ_α -Norm,” arXiv:1602.04577, 78 pages, February, 2016, available from <https://arxiv.org/abs/1602.04577>.

[4] Yuta Sakai, Ken-ichi Iwata, “Extremal Relations Between Shannon Entropy and ℓ_α -Norm,” arXiv:1601.07678, 35 pages, January, 2016, available from <https://arxiv.org/abs/1601.07678>.

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

岩田 賢一 (IWATA, Ken-ichi)

福井大学・学術研究院工学系部門・准教授

研究者番号: 80284313

(2) 研究協力者

阪井 祐太 (SAKAI, Yuta)