

令和 5 年 6 月 7 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K04150

研究課題名（和文）未知パラメータを含む情報源符号化問題に対する情報スペクトルのアプローチ

研究課題名（英文）Information Spectrum Approach to Source Coding Problems with Unknown Parameters

研究代表者

野村 亮（Nomura, Ryo）

早稲田大学・データ科学センター・教授

研究者番号：90329102

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題は、情報源符号化におけるいくつかの重要な問題設定を対象に、確率構造が未知の状況における高効率符号化に関する研究を行うものである。特に本研究ではこれらの問題において誤り確率を適切に設定すると確率構造が未知の状況が混合情報源を対象とする問題設定として表現できることに着目し特に混合情報源を対象とした解析に重点を置いている。研究機関を通じて情報源符号化およびそれと関わりの深い情報理論的乱数生成問題である情報源Resolvability問題およびIntrinsic Randomness問題について解析を行った。これらの結果からそれぞれの問題に内在するあらたな関係が明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

研究期間を通じて情報理論的な乱数生成問題に対して分析を行った。得られた結果から情報理論的な乱数生成問題と情報源符号化問題との関連が明らかになった。意義の一つとして情報源符号化の乱数生成としての一面が明らかになったことがあげられる。

またこれらの乱数生成問題は情報セキュリティ問題と関連していることも知られている。本研究結果を直接セキュリティ問題に適用することはできないが、この結果をさらに発展させ情報理論的なセキュリティ問題に対する解析を行うことが考えられる。

研究成果の概要（英文）：The objective of this research project is to study several important problems related to the information source coding. In particular, we have analyzed the Source Resolvability problem and the Intrinsic Randomness problem, which are information-theoretic random number generation problems. The source resolvability problem and the Intrinsic Randomness problem are closely related to source coding problem. Our results reveal a new relationship between each problem and the source coding problem.

研究分野：情報理論

キーワード：情報理論

## 1. 研究開始当初の背景

情報社会の進展に伴い、ネットワーク上で通信される情報量は増加の一途を辿っている。情報通信の基礎理論の一つである情報理論においては、一対一通信の様々な問題設定において 1) 誤りなくデータを伝送可能な条件、2) それを達成する効率的なアルゴリズムの提案、に関する研究が行われてきた。代表的な問題設定は情報源符号化、通信路符号化などである。研究開始当初この条件を従来より精密に評価する研究が、理論的な側面のみならず実用的な面からも注目を浴びていた。これらの成果は有限長解析や 2 次最適レートの評価等と呼ばれている。

また、1970 年代より一対一通信の問題を複数の送信者から複数の受信者へと拡張した多対多通信問題が扱われるようになった。これらは多端子情報理論と呼ばれ、一対一通信の問題と同様に誤りなく伝送可能な条件や実用的なアルゴリズムが研究されてきた。多端子情報理論においても一部の問題設定において 2 次最適レートの研究が行われている状況であった。

## 2. 研究の目的

背景で述べた 2 次最適レートの研究など符号化の精密評価に関わる研究は理論実用の両面から重要であるが、情報源符号化をとってみても無歪み情報源符号化、有歪み情報源符号化など多くの問題設定がある中でこの 2 次最適レートの導出が行われていない問題設定も多くある。本研究ではこのような状況の中で情報源符号化およびその関連問題に対して 2 次最適レートを導出することを目的としている。またこの導出に際し対象とする情報源として特に混合情報源を考えることが一つの特徴としていた。これは情報源の確率構造が未知の状況と対応しているためである。

## 3. 研究の方法

本研究では、主に混合情報源を仮定した場合の 2 次最適レートの導出を試みた。特に解析手法として近年有力な手法とされている情報スペクトル的方法を用いた。ただし前提として 2 次最適レートの導出には 1 次最適レートの導出が不可欠である。1 次最適レートが導出されていない問題に対しては 1 次最適レートの導出を優先した。また、情報スペクトル的手法ではまず確率構造に特別な仮定をおかない一般情報源を考え、最適レートの一般公式を導くことが目標となる。本研究でも一般公式が未導出である問題に対しては一般公式の導出を行い、その後混合情報源への適用を試みた。

## 4. 研究成果

研究対象は、情報源符号化問題、Resolvability 問題、Intrinsic Randomness 問題の三つに大別できる。

### (1) 情報源符号化問題

微少な誤り確率を許容する可変長情報源符号化問題における 1 次および 2 次最適レートの導出

可変長情報源符号化問題の評価基準の一つとしてオーバーフロー確率がある。オーバーフロー確率とは符号長があるしきい値を超過する確率を表し、オーバーフロー確率の解析はバッファに制約のある符号器や復号器の設計開発に寄与する。本研究では微少な誤り確率を許容する可変長符号化においてオーバーフロー確率が一定値以下になるためのしきい値の下限（最適オーバーフローしきい値）の一般公式導出を試み、実際に 1 次および 2 次最適しきい値の一般公式導出に成功した。得られた一般公式は一見複雑であるが、別表現を考えることにより混合情報源に対して容易に適用できることが確認できた。またこの一般公式は誤り確率とオーバーフロー確率の間にある関係を示していると言える。

### コスト付き可変長情報源符号化問題における 1 次および 2 次最適レートの導出

符号長を一般化した概念である符号コストに対してその最適符号化レート（平均符号コストの最小値）を考える状況はコスト付き情報源符号化と呼ばれる。各符号語に非対称な符号コストを課す状況は例えば、モールス符号におけるドットおよびダッシュの送信時間が異なる状況などを表す。（従来の符号長で考えるとドットおよびダッシュの送信にかかるコストが同じと仮定していることになる。）このように符号長でなく符号コストを考えることは実用上大変重要である。本研究では、コスト付き可変長情報源符号化において符号コストが一定値を超過するコストオーバーフロー確率を考え、コストオーバーフロー確率が一定値以下になるもとの最適な符号長を評価した。特に 1 次 2 次の最適レートを評価したことが特徴である。また本結果は、従来研究代表者により得られていた結果を論文投稿としてまとめた結果であるがその際にコストの制約の拡張についても検討している。

### (2) Resolvability 問題

f ダイバージェンスを距離尺度とする情報源 Resolvability 問題における 1 次および 2 次最

### 適レートの導出

情報源 Resolvability 問題 (Resolvability 問題) とは、与えられた情報源を一様乱数を用いて近似する問題であり、その最適レートは情報源符号化問題における最適レートと関連していることが知られていた。一方近似尺度として確率分布間の距離を用いるが従来は変動距離や KL 情報量を用いることが一般的であった。本課題では従来近似尺度として用いられていた変動距離や KL 情報量を一般化した  $f$  ダイバージェンスを用いて、情報源 Resolvability 問題における 1 次および 2 次最適レートを導出した。 $f$  ダイバージェンスは変動距離、KL 情報量以外にも Hellinger 距離などの代表的な距離を含む距離であり得られた結果からこれらの距離に対する直ちに得ることができる。その意味で従来結果を一般化した結果となっている。

### 正規化 $f$ ダイバージェンスを距離尺度とする情報源 Resolvability 問題と情報源符号化問題の関係

(2)- で得られた結果は一般的な距離尺度である  $f$  ダイバージェンスに関する結果であったが、ここで対象としていない距離尺度のうち情報理論で議論されているものの一つに正規化 KL 情報量がある。ここではこれを一般化した正規化  $f$  ダイバージェンスに基づく最適レートを考えた。そしてこれが情報源符号化問題におけるある特殊な状況に置ける最適レートと一致することを示した。情報源符号化問題と Resolvability 問題のある種の関係が明らかになった。

### (3) Intrinsic Randomness 問題

#### $f$ ダイバージェンスを距離尺度とする情報源 Resolvability 問題における 1 次および 2 次最適レートの導出

Intrinsic Randomness 問題とは、与えられた情報源から一様乱数を生成する問題であり、Resolvability 問題と双対な問題として知られている。またその最適レートはやはり情報源符号化問題におけるある種の最適レートと関連していることが知られていた。Intrinsic Randomness 問題においても近似尺度として確率分布間の距離を用いるが従来は変動距離や KL 情報量を用いることが一般的であった。本課題ではこれに対して  $f$  ダイバージェンスに基づく Intrinsic Randomness 問題を考え、この問題設定に対する 1 次および 2 次最適レートを導出した。(2)- で得られた結果と双対な結果と考えることができる。

#### 正規化 $f$ ダイバージェンスを距離尺度とする情報源 Resolvability 問題と情報源符号化問題の関係

(3)- で得られた結果を保管する意味で、(3)- では対象としていない距離尺度である正規化  $f$  ダイバージェンスに基づく最適レートを考えた。これが情報源符号化問題におけるある特殊な状況に置ける最適レートと一致することを示した。この結果は(2)- で得られた結果と双対な結果とみなすことができる。情報源符号化問題と Intrinsic Randomness 問題のある種の関係が明らかになった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Nomura Ryo	4. 巻 66
2. 論文標題 Source Resolvability and Intrinsic Randomness: Two Random Number Generation Problems With Respect to a Subclass of $f$ -Divergences	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Information Theory	6. 最初と最後の頁 7588 ~ 7601
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TIT.2020.3009208	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Nomura Ryo, Yagi Hideki	4. 巻 65
2. 論文標題 Optimum Overflow Thresholds in Variable-Length Source Coding Allowing Non-Vanishing Error Probability	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Information Theory	6. 最初と最後の頁 8213 ~ 8221
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/tit.2019.2920417	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Nomura Ryo	4. 巻 65
2. 論文標題 Overflow Probability of Variable-Length Codes With Codeword Cost	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Information Theory	6. 最初と最後の頁 8194 ~ 8206
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/tit.2019.2941888	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計17件（うち招待講演 2件/うち国際学会 8件）

1. 発表者名 Ryo Nomura
2. 発表標題 Relationship Between Intrinsic Randomness with $f$ -Divergence and Fixed-Length Source Coding
3. 学会等名 2022 IEEE International Symposium on Information Theory（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野村亮
2. 発表標題 確率分布の近似問題と情報源符号化
3. 学会等名 電子情報通信学会 ソサイエティ大会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野村亮
2. 発表標題 正規化KL情報量に基づく Intrinsic Randomnessと固定長情報源符号化
3. 学会等名 電子情報通信学会 情報理論研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ryo Nomura
2. 発表標題 Relationship Between Source Resolvability with Normalized $f$ -Divergence and Fixed-Length Coding
3. 学会等名 2020 IEEE Information Theory Workshop (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryo Nomura, Hideki Yagi
2. 発表標題 Optimum Intrinsic Randomness Rate with Respect to $f$ -divergences Using the Smooth Min Entropy
3. 学会等名 2021 IEEE International Symposium on Information Theory (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryo Nomura and Hideki Yagi
2. 発表標題 Optimum Source Resolvability Rate with Respect to $f$ -divergences Using the Smooth Renyi entropy,
3. 学会等名 2020 IEEE International Symposium on Information Theory (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野村亮, 八木秀樹
2. 発表標題 $f$ ダイバージェンスに基づく Intrinsic RandomnessレートのSmooth最小エントロピーによる表現
3. 学会等名 電子情報通信学会 情報理論研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野村亮, 堀井俊祐
2. 発表標題 ノイズを含むデータからの仮説検定問題に対する情報スペクトルのアプローチ
3. 学会等名 電子情報通信学会 情報理論研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryo Nomura
2. 発表標題 Intrinsic Randomness Problem with Respect to a Subclass of $f$ -divergence
3. 学会等名 2019 IEEE Information Theory Workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryo Nomura
2. 発表標題 Source Resolvability Problem with Respect to a Certain Subclass of $f$ -divergence
3. 学会等名 2019 IEEE International Symposium on Information Theory (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野村亮
2. 発表標題 正規化 $f$ -ダイバージェンスに基づく情報源Resolvability と固定長情報源符号化
3. 学会等名 電子情報通信学会 情報理論研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野村亮
2. 発表標題 $f$ -ダイバージェンスに基づく情報源Resolvability レートのSmooth Rényi エントロピーによる表現
3. 学会等名 第11回シャノン理論ワークショップ
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野村亮
2. 発表標題 $f$ -ダイバージェンスの部分クラスと情報源Resolvability
3. 学会等名 電子情報通信学会情報理論研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryo Nomura and Hideki Yagi
2. 発表標題 Overflow Probability of Codeword Cost in Variable-Length Coding Allowing Non-Vanishing Error Probability
3. 学会等名 2018 International Symposium on Information Theory and Its Applications (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 野村亮
2. 発表標題 f-ダイバージェンスの部分クラスと Intrinsic Randomness
3. 学会等名 第41回情報理論とその応用シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 野村亮
2. 発表標題 f-ダイバージェンスを誤差尺度とした二次情報源 Resolvability レート
3. 学会等名 電子情報通信学会情報理論研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryo Nomura
2. 発表標題 Random Number Generation Problems with respect to f-Divergence
3. 学会等名 AMS Spring Central and Western Joint Sectional Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年



〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

早稲田大学研究者データベース  
<http://researchers.waseda.jp/profile/ja.50460283c5a61f9dbf702c04877e6f03.html>

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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------