

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：32634

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760346

研究課題名(和文) 確率構造が未知のセンサネットワークにおける高信頼符号化に関する研究

研究課題名(英文) Reliable communication on the sensor network with unknown probabilistic structure

研究代表者

野村 亮 (NOMURA, Ryo)

専修大学・ネットワーク情報学部・准教授

研究者番号：90329102

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,800,000円、(間接経費) 540,000円

研究成果の概要(和文)：センサネットワークへの応用を念頭に、多端子情報理論における確率構造が未知の問題について解析を行った。特に確率構造が未知の状況の一部は誤り確率を適切に設定すると混合情報源・混合通信路を用いて表すことができることに着目し、混合情報源に対する解析を行った。また、近年有限長解析や2次最適レートの評価と呼ばれる従来より精密に伝送可能な条件(許容可能な微少な誤り以下での通信を可能とするための条件)が注目を集めているが、本研究では一対一の情報源符号化問題、多対一の情報源符号化問題に対して混合情報源を仮定して2次最適レートを導出した。また一部の通信路符号化問題に対しても同様の手法が有効であることを確認した。

研究成果の概要(英文)：We have analyzed fundamental properties of sensor network on the basis of the multi-terminal information theory. In particular, we have considered the mixed sources and mixed channels, and derived the fundamental limits on the reliable communication. This is because some situations in which we know the class of probabilistic model but we do not know its parameter, can be formulated by the mixed models. We have determined the optimal second-order achievable rates in the single source coding problem and the optimal achievable rate region in the multi-terminal source coding problem. Moreover, we have observed that the optimal achievable rates in some problems on channel coding can be determined by using the similar approach.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、通信・ネットワーク工学

キーワード：情報通信工学 情報理論 センサネットワーク

1. 研究開始当初の背景

多数のセンサデバイスをネットワークで結んでセンシングを行うセンサネットワークは、広範な応用分野を持つことが知られており、その理論的枠組みの構築が急務となっている。そのような中、情報通信の基礎理論の一つである情報理論を用いて、センサネットワークを数理モデル化する研究が成果を上げている状況であった。情報理論では、一対一通信から多対多通信の様々な問題設定において、誤りなく伝送可能な条件やそれを達成する効率的なアルゴリズムの研究が行われてきた。特に多対多通信での問題を扱う情報理論は多端子情報理論と呼ばれている。情報理論において代表的な数理モデルは情報源符号化問題、通信路符号化問題と呼ばれており、これらは確率分布を用いて表現される。従来、特に多端子情報理論では多くの場合、その確率構造が既知という仮定が置かれていた。

2. 研究の目的

従来の多端子情報理論では、対象とする情報源、通信路の確率構造が既知という仮定が置かれていた。実際の通信への応用上これらの仮定は、送信対象の生起確率が既知、ノイズの生起確率が既知、という状況に相当するが、応用上これらの生起確率が未知の状況は少なくないと考えられる。しかしながら、多端子情報理論においてはそれぞれの確率構造が未知に対する解析はほとんど行われていない状況であった。さらに近年では、誤りなく伝送可能な条件をそれまでより精密に評価する研究が登場し注目を集めていた。それらは「有限長解析」や「2次最適レートの導出」と呼ばれており、一対一通信における情報源符号化モデル、通信路符号化モデルの双方に対して導出されていた。しかし多端子情報理論においてこれらを実験する研究はほとんどなかった。

以上の状況を踏まえて本研究では、多端子情報理論におけるいくつかの問題において、特に、確率構造が未知の状況への展開をふまえて精密な評価(2次最適レートの導出)を行うことを目的に研究を行った。特に問題設定によっては、一対一通信モデルにおいてさえも解かれていない問題があることが分かったため、多対多通信モデルへの展開を念頭に置いて、一対一通信モデルを対象とした解析も行った。

3. 研究の方法

従来の一対一通信モデルを扱った情報理論においても、当初は情報源や通信路の確率構造は既知という仮定が置かれていたが、その後これら仮定が外され、確率構造が未知の状況へと拡張された経緯がある。一方、確率構造が未知の状況の一部は、混合情報源、混合通信路を用いてモデル化できることも分かっている。

そこで本研究では、一対一通信モデルから多対一通信モデルまでを対象に、混合情報源混合通信路を仮定し、従来より精密な評価(2次最適レートの導出)を行った。特に解析手法としては近年情報理論において有力とされている情報スペクトルという手法を用いた。対象とした通信モデルは次の通りである。

(1) 一対一通信モデル

混合情報源符号化問題における2次最適レートの導出

一対一の情報源符号化においては、既に2次最適レートが導出されていたが、混合情報源に対する解析は行われていなかった。本研究では、混合情報源を対象に解析を行った。特に情報源符号化問題は、固定長符号化と可変長符号化の問題に大別できる。本研究ではそれぞれを対象に研究を行った。

混合通信路符号化問題に対する2次最適レートの導出

一対一の通信路符号化においても、定常無記憶通信路という基礎的な確率モデルにおいて2次最適レートは導出されていた。本研究では、これを混合通信路へと拡張することを試みた。

(2) 多対一通信モデル

多対一通信モデルにおいて、情報源符号化問題、通信路符号化問題の代表的な問題はそれぞれ、Slepian-Wolf符号化問題、多重アクセス通信路符号化問題と呼ばれる。本研究では特にSlepian-Wolf符号化問題を対象に、研究を行った。

4. 研究成果

(1) 一対一通信モデル

固定長混合情報源符号化における2次最適レートの導出

一対一の基本的な固定長情報源符号化問題において、混合情報源を仮定し、2次最適レートを導出した。2次最適レートの導出においては、中心極限定理が中心的な役割を果たすことが知られており、特に中心極限定理が成立する定常無記憶情報源、一部のマルコフ情報源に対する解析が行われていた。しかしながら、中心極限定理が成立しない情報源に対しては、一般公式は得られていたものの、実際の計算は容易ではなかった。本研究では先に述べたとおり、実用的にも重要な混合情報源を対象としたが、混合情報源は非エルゴードな情報源の代表であり、中心極限定理が成立しない情報源である。本研究では混合情報源の中でも特に、複数の定常無記憶情報源を要素とする混合情報源を考えた。そしてその場合、混合情報源に対する伝送可能条件が各要素情報源の伝送可能条件に分解できることを示した。これにより、各要素情報源が中心極限定理を満たせば、混合情報源における伝送可能条件もまた、中心極限定理の混合を用いて表されることになる。この結果を用

いて、混合情報源に対する2次最適レートを導出した。特に、要素情報源が、有限個の場合、加算無限個の場合、連続な集合に要素を取る場合についてそれぞれ導出したが、有限個の場合、加算無限個の場合については、情報源のアルファベットが加算無限個の状況においても2次最適レートを導出した。一方、一般の連続な定常無記憶情報源上での混合に対しては、有限個のアルファベットに対して同レートを導出した。この結果は非エルゴードな確率分布に対して、中心極限定理を用いて2次最適レートを導出した最初の成果であり、今後より広い情報源への拡張の礎となる重要な結果と言える。

乱数生成問題における混合情報源に対する2次最適レートの導出

乱数生成問題とは、離散一様乱数に関する変換（符号化）問題で、「Resolvability 問題：離散一様確率分布を用いて情報源の確率構造を近似する問題」と「Intrinsic Randomness 問題：情報源から得られる情報を変換して離散一様確率分布を近似する問題」に大別できる。乱数生成問題は従来計算機科学の分野で考えられていた問題で、暗号化アルゴリズムやシミュレーションアルゴリズムへの応用が期待されている。

従来 Resolvability 問題における最適レートが、情報源符号化モデルにおける最適レートと双対の関係にあることが示されていた。本研究ではこの双対性が、2次の最適レートにおいても成立することを明らかにした。得られた結果は、一般情報源という混合情報源を含む極めて広い情報源に成立する結果である。このことと前に述べた混合情報源符号化モデルに対する2次最適レートの結果から混合情報源を対象とする Resolvability 問題における2次最適レートを直ちに導出できる。また Intrinsic Randomness 問題においても混合情報源を対象に、同様の2次最適レートが中心極限定理を用いて導出できることを示した。本成果はセンサネットワークを対象とした一対一混合情報源符号化問題から派生した副次的な成果とも考えられるが、多端子情報理論の発展に寄与する結果と考えている。

コスト付き可変長情報源符号化問題における2次最適レートの導出

従来、一対一可変長符号化の評価基準には平均符号長が用いられていたが、1990年代からオーバーフロー確率という新しい基準が提案されていた。また、従来の可変長符号化を一般化したコスト付き可変長符号化という問題設定が考えられていた。本研究では、コスト付き可変長情報源符号化問題に対し、オーバーフロー確率を導入し、オーバーフロー確率が一定値以下になる為の条件としてオーバーフロー達成可能最適レートとそれを精密化した2次のオーバーフロー達成可能

最適レートを定義した。続いて情報スペクトル理論に基づきこれらの最適レートをそれぞれ明らかにした。この結果は、最適レートを達成する符号化法の提案を含んでいることも特色の一つである。当初は、一般情報源と定常無記憶情報源という代表的な二つの情報源に対する解析であったが、最終的に混合情報源に対する結果を得ることができた。この結果は今後多対一通信モデルへの拡張、特に補助情報を伴う情報源符号化への拡張が考えられる。

また、この結果を得る過程でコスト付き可変長情報源符号化におけるオーバーフロー確率と固定長情報源符号化における誤り確率の関係も明らかになった。コスト関数として様々な関数が考えられるが、ここで示したのはその中でも比較的取り扱いやすいモデルとなっている。この一般化は今後の課題である。可変長情報源符号化問題は固定長情報源符号化問題より実用的な問題である。その点から本結果はまた固定長符号化問題での結果と異なる意味を持つと考えている。

混合通信路符号化問題

情報源符号化問題と対をなす重要な問題の一つが通信路符号化問題である。本研究では、混合通信路符号化問題においても2次最適レートの導出を試みた。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が、混合通信路符号化モデルにおいては、1次最適レートに関する結果も十分に得られていないことが判明した。そこで2次最適レートの導出に取り組む前に1次最適レートの導出に取り組んだ。結果、限定した条件のもとで1次最適レートを導出することができた。この結果を用いて今後2次最適レートの導出を行うことが今後の課題である。またこの結果は、定常無記憶通信路の有限個の混合、加算無限個の混合に限られた話であったので、これを連続の混合へ拡張することも今後の課題となる。

(2) 多対一通信モデル

Slepian-Wolf (SW) 符号化問題における2次最適レートの導出

多対一の情報源符号化モデルにおける最も基本的な同モデルにおいて、誤り確率と符号化レートペアとの関係について解析を行った。誤り確率が漸近的に微小な値以下になることを要請したもとの符号化レートの最小値は達成可能最小レート (SW モデルを考えた場合はレートが複数存在する為レートの組、ペアとなる) と呼ばれるが、本研究でも同様に従来よりも精密に誤り確率と符号化レートペアの関係を解析するべく、新しく SW 型の通信モデルにおいて2次の達成可能最小レートを拡張した2次の達成可能領域を定義した。そしてレートペアが達成可能領域に含まれるための必要十分条件を明らかにした。これまでの研究で、同問題に対して研究

代表者が得た結果では、定常無記憶情報源において必要条件と十分条件が一致していなかったが、本結果では解析手法を見直すことにより、これらが一致する必要十分条件を示すことができた。

またこの結果に基づいて混合情報源に対してその必要十分条件を導出した。多端子情報理論における2次最適レートの解析において混合情報源に対する結果を導いた結果は過去になかった。その意味で本結果は大変新しく、意義があると考えられる。

補助情報を伴う情報源符号化におけるオーバーフロー確率の解析

多対一の情報源符号化モデルにおけるもう一つの代表的な問題は、補助情報を伴う情報源符号化問題（補助情報源符号化モデル）である。SW符号化モデルは、複数の情報源から発生する複数の通報全ての復元が要請されているのに対し、補助情報源符号化モデルでは、複数の通報のうち一部の復元のみを要請している。この問題はSW符号化モデルの一部とも考えられるが、動画圧縮などに用いられることが分かっており、SW符号化モデルとは独立に解析されている。

補助情報を伴う情報源符号化のオーバーフロー確率の2次最適レートは研究代表者等により、一般情報源、定常無記憶情報源に対して既に求められていたが、上で述べた結果と同様の考えで、混合情報源に対して解析できることが分かった。今後さらに解析を進める予定である。

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 3 件)

Ryo Nomura, Te Sun Han, "Second-Order Resolvability, Intrinsic Randomness, and Fixed-Length Source Coding for Mixed Sources: Information Spectrum Approach," IEEE Trans. Information Theory, Vol. 59, No.1, pp. 1-16, 2013.

Ryo Nomura, Toshiyasu Matsushima, "On the Overflow Probability of Fixed-to-Variable Length Codes with Side Information," IEICE Trans. Fundamentals, Vol. E94-A, No. 11, pp. 2083-2091, 2011.

Ryo Nomura, Toshiyasu Matsushima, "An Analysis of Slepian-Wolf Coding Problem Based on the Asymptotic Normality," IEICE Trans. Fundamentals, Vol. E94-A, No. 11, pp. 2220-2225, 2011.

〔学会発表〕(計 11 件)

Hideki Yagi, Ryo Nomura, "Single-Letter Characterization of Epsilon

-Capacity for Mixed Memoryless Sources," 電子情報通信学会情報理論研究会, 2014年3月, 名古屋.

Ryo Nomura, "Relationship between the Overflow Probability of Variable-length Coding and the Error Probability of Fixed-length Coding," 第36回情報理論とその応用シンポジウム, 2013年11月, 伊東.

八木秀樹, 野村亮, "混合通信路のクラスに対する最適な2次符号化レート," 第36回情報理論とその応用シンポジウム, 2013年11月, 伊東.

Ryo Nomura, "Second-order achievable rates in resolvability problem with respect to KL-Divergence," 第8回シャノン理論ワークショップ, 2013年10月, 広島.

Ryo Nomura, Te Sun Han, "Second-Order Slepian-Wolf Coding Theorems for Non-Mixed and Mixed Sources," 2013 IEEE International Symposium on Information Theory, 2013年7月, イスタンブール.

Ryo Nomura, "Overflow Probability of Variable Length Codes with Cost Function for Mixed Sources," 電子情報通信学会情報理論研究会, 2013年1月, 東京.

Ryo Nomura, Te Sun Han, "Second-Order Slepian-Wolf Source Coding Theorems," 第35回情報理論とその応用シンポジウム, 2012年12月, 別府.

Ryo Nomura, Te Sun Han, "Second-Order Achievable Rates in Random Number Generation for Mixed Sources," 2012 IEEE International Symposium on Information Theory, 2012年7月, ボストン.

Ryo Nomura, Toshiyasu Matsushima, "Information Spectrum Approach to Overflow Probability of Variable-Length Codes with Conditional Cost Function," 2012 IEEE International Symposium on Information Theory, 2012年7月, ボストン.

Ryo Nomura, "Overflow Probability of Variable-length Codes with Unequal Costs on Code Symbols," 第34回情報理論とその応用シンポジウム 2011年11月, 岩手.

Ryo Nomura, "Second-Order Source Coding Theorem for Slepian-Wolf Coding Problem," 電子情報通信学会情報理論研究会, 2011年9月, 東京.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

野村 亮 (NOMURA, Ryo)

専修大学・ネットワーク情報学部・准教授
研究者番号: 90329102