

機関番号：32634
研究種目：若手研究(B)
研究期間：2009～ 2010
課題番号：21760298
研究課題名(和文) 多端子情報理論に基づく未知情報を含んだセンサネットワークの信頼度評価
研究課題名(英文) An Evaluation of the Reliability in Sensor Network with Partially Unknown Structure on the basis of the Multi-terminal Information Theory
研究代表者
野村 亮 (NOMURA RYO)
専修大学・ネットワーク情報学部・講師
研究者番号：90329102

研究成果の概要(和文)：

広範な応用分野を持つセンサネットワークの基礎的性質について多端子情報理論に基づいて考察した。本研究では特にセンサネットワークの基本とも言える多対一のネットワークを対象とした。従来はセンシング対象や雑音の生起確率が既知の状況で、誤りなくセンシング情報を伝送可能な条件について解析されていたが、本研究ではこの生起確率が既知という仮定を取り除き生起確率が未知のもとで誤りなくセンシング情報を伝送可能な条件について解析した。

研究成果の概要(英文)：

In this research, we have analyzed fundamental properties of sensor network on the basis of multi-terminal information theory. In almost all previous researches in multi-terminal information theory, the probabilities of sensing objects and/or noise in communication were assumed to be known. However, in practical setting, these probabilities maybe unknown and hence we have considered the situation that these probabilities are unknown. In this situation, we have clarified the condition that there exists a code, whose error probability is required to be smaller than or equal to some constant.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	800,000	240,000	1040,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,300,000	390,000	1690,000

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：センサネットワーク，多端子情報理論，情報スペクトル理論，シャノン理論，中心極限定理，漸近正規性

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だ通信システムを用いてセンシングを行うセンサネットワークは、環境測定、セキュリティなど、多様な応用分野を持ちその理

論的枠組みの構築が求められていた。それに対し、近年センサネットワークに対し情報理論を用いてその構造を数理モデル化し、基礎的性質を考察する研究が一定の成果を挙げている。

情報通信の基礎理論の一つである情報理論においては、当初一対一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。一方 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、既に述べたように近年ではセンサネットワークのセンシングの過程が多端子情報理論を用いて定式化できることが示されていた。多端子情報理論においても従来の情報理論と同様、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が提案されていた。しかしながら、従来の多端子情報理論における研究では対象とする情報源や通信路の確率構造を既知と仮定していた。

2. 研究の目的

多端子情報理論において情報源、通信路の確率構造が未知の場合についてはほとんど研究されていない状況であった。多端子情報理論を用いてセンサネットワークを定式化した場合、情報源、通信路の確率構造が既知という仮定は、それぞれ観測信号の生起確率が既知である仮定、ネットワークにおける誤りの生起確率が既知である仮定に相当する。この点から考えると応用上、情報源、通信路の確率構造が未知の場合の問題設定は非常に重要と思われるが、先に述べたとおりこれらが未知の問題設定ではほとんど研究が行われていなかった。

また多端子情報理論においては二対一の比較的簡単な通信モデルからフィードバックを含む多対多の複雑な通信モデルまで多くの種類が考えられるが、センサネットワークでは多対一の通信モデルが基本となると考えられており、多対一通信モデルの研究が行われていた。

以上の状況を踏まえて本研究では、種々の多対一通信モデルにおいて、情報源と通信路の確率構造が未知の場合を対象に大きく次の二つのステップで研究を行った。それぞれのステップにおける研究目的は次の通りである。

- (1) 対象とする通信モデルに対して許容される誤り以下で伝送可能となる条件を導くこと。
- (2) 実際に誤りなく伝送可能な符号化・復号化アルゴリズムを提案し、空間計算量等の評価を行うこと。

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であったが、その後これらが未知

の場合へと拡張されたという経緯を持つ。一対一通信モデルにおいて、その通信モデルは情報源符号化モデル、通信路符号化モデル、情報源通信路結合符号化モデルの三つに大別できるが、同様に多対一の通信モデルも、これら三つのモデルに大別できる。

本研究では主に、情報源符号化モデル、情報源通信路結合符号化モデルにおいて、誤りなく伝送可能な条件の導出を行った。

- (1) 相関のある情報源符号化モデルにおける情報源の確率構造が未知の場合の解析

多対一の情報源符号化は Slepian-Wolf 符号化システム、補助情報を伴う符号化システムに大別できる。これらのモデルにおいて情報源の確率構造が未知の場合の誤り確率（固定長符号化）やオーバーフロー確率（可変長符号化）を中心極限定理、情報スペクトル理論に基づいて評価した。特に近年一対一の符号化においては従来よりも精密にその限界を評価する方法（2次の達成可能性）が登場している。本研究では2次の達成可能性を多対一の情報源符号化に適用した。2次の達成可能性は極めて新しい概念であるので、まだ確率構造が既知の場合ですら導入されていなかった。そこで研究は情報源の確率構造が既知の場合の解析から開始し、確率構造が未知の場合へと拡張することとした。

- (2) 情報源通信路結合符号化モデルにおける情報源の確率構造が未知の場合の解析

同モデルの解析においては、従来一対一の情報理論における確率構造が未知の場合の問題すら解かれていない状況であった。そこでまず一対一の通信モデルに対して情報スペクトル理論を用い、伝送可能条件を導出した。さらにそこで得られた結果を多対一の通信モデルへと拡張し、伝送可能条件を明らかにした。

4. 研究成果

- (1) 相関のある情報源における伝送可能条件の導出とそのオーバーフロー確率の解析に対する適用

① Slepian-Wolf (SW) 型通信モデル

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一定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、特に、近年一対一の情報源符号化モデルにおいては従来の解析よりも精密な解析を目標に2次の達成可能最小レートという概念が導入されている。

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十分条件と必要条件を明らかにした。ここで得られた結果は相関のある情報源の確率構造が既知の場合の結果であるが、さらにこれを未知の場合に適用できることも明らかとなった。これら条件の導出の中心的な役割となった手法は、中心極限定理と情報スペクトル理論であり、別の言い方をすれば SW 型モデルにおいてもこれらを用いた解析が有効であることが確認されたことになる。

② 補助情報を伴う情報源符号化モデル

多対一の情報源符号化モデルにおけるもう一つの重要なモデルは補助情報を伴う情報源符号化モデルである。SW 型モデルとの違いは、SW 型モデルが複数の情報源から発生する複数の通報を全て復元することを目的にしているのに対し、本モデルでは複数の通報のうち一つのみを復元することを要請している点である。復元する一つの通報以外の通報を全て補助情報として用いることで、一対一での通信よりも符号化の効率を上げることができる。本研究ではこのモデルにおいても情報源の確率構造が既知である状況を仮定し、2 次の達成可能最小レートの評価を行った。得られた結果は確率構造が未知の場合に拡張可能である。

本モデルにおける結果も情報スペクトル理論と中心極限定理に基づいているが、特筆すべき点は、SW 型モデルにおいては十分条件と必要条件が異なるという結果となったのに対し、本モデルにおいてはこれらが同一、すなわち必要十分条件を求めることができたという点である。

③ 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

さらに、補助情報を伴う情報源符号化における解析を進めていた際に同結果を可変長符号化におけるオーバーフロー確率に対する解析に適用できることもわかった。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、'90 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。本研究では、補助情報を伴う可変長情報源符号化に対し、オーバーフロー確率を初めて導入した。そして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小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小レートを定義した。続いて情報スペクトル理論に基づきこれらの最小レートを明らかにした。さらにこの最小レートを達成する符号化法を提案した。ここでの結果から可変長符

号化におけるオーバーフロー確率と固定長符号化における誤り確率の関係が明らかになった。従来、補助情報を伴う情報源符号化のオーバーフロー確率を解析した結果はなかった為、情報源の確率構造が既知の場合の解析から始めることとなった。今後は得られた結果を情報源の確率構造が未知の場合へと適用することを考える。

(2) 情報源通信路結合符号化モデルにおける情報源の確率構造が未知の場合の解析

① 一対一通信モデル

同モデルは、情報源の確率構造と通信路の確率構造の二つの確率構造が存在する複雑なモデルであり、従来一対一の通信においても確率構造が未知の場合には、その伝送可能条件が明らかにされていなかった。そこで本研究ではまず一対一の通信において、情報源の確率構造が未知、通信路の確率構造は既知という設定を考えた。そしてこの元で要請された誤り確率以下を達成する符号が存在する為の情報源、通信路に対する条件を明らかにした。本成果の特色は、当初一般情報源、一般通信路という極めて広い確率構造を持つクラスを対象に（但し確率構造は既知として）考察したということにある。これは研究を進めていく過程で確率構造が未知の場合、その誤り確率の評価を適切に設定すれば一般情報源、一般通信路に対して得られた結果を適用可能であることが分かったためである。これに基づいて一般情報源、一般通信路について得られた結果を確率構造が未知の設定へと適用した。

② 多対一通信モデル

さらにここで得られた結果を拡張して多対一の情報源通信路結合符号化モデルを対象に、情報源の確率構造が未知、通信路の確率構造が既知のモデルを考えた。一対一の場合と同様に、一般情報源を仮定し、結果を得た。この結果を情報源の確率構造が未知の場合へと適用し、誤り確率が一定値以下になる為の必要条件と十分条件を明らかにした。微少な誤り確率を許容する場合は、これらの条件は一致しないが、誤り確率が 0 になるという条件を仮定するとこれらの条件が微少量を除いて一致することが明らかになった。

(3) 一対一通信モデルにおける乱数生成問題の評価

多対一の情報源符号化モデルに関する研究を進めていく過程で、本研究の成果が乱数生成問題に適用できることが明らかとなった。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る。

従来 Resolvability 問題における達成可能最小レートが、情報源符号化モデルにおける達成可能最小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 次の達成可能最小レートにおいても成立することを明らかにした。

得られた結果は一対一の通信モデルに限定されており、多対一の通信モデルにおける結果は今後の課題となっている。多対一の通信モデルにおける乱数生成問題自体は従来考えられているが、2 次の達成可能レートペアに関する解析は未だなされていない。今後この研究を多対一の乱数生成問題へと適用できることが分かったという点からも今回の結果は有意義なものである。

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)

- ① 野村亮, 吉田隆弘, 松嶋敏泰, “KL 情報量を制約とした Resolvability 問題における達成可能性条件の評価,” 電子情報通信学会論文誌, Vol. J93-A, No. 3, pp. 216-221, 2010. 査読有.
- ② 野村亮, 松嶋敏泰, “多端子情報理論に基づくセンサネットワークのモデル化と信頼度評価,” 情報処理学会論文誌: 数理モデル化と応用, Vol. 3, No. 1, pp. 13 - 24, 2010. 査読有.
- ③ Ryo NOMURA, Toshiyasu MATSUSHIMA, “On the Condition of ϵ -Transmissible Joint Source-Channel Coding for General Sources and General Channels,” IEICE Trans. Fundamentals, Vol. E92-A, No. 11, pp. 2936-2940, 2009. 査読有.

[学会発表] (計 6 件)

- ① Ryo NOMURA, Toshiyasu MATSUSHIMA, “Achievable Condition in Resolvability Problem for Mixed Sources,” 第 33 回情報理論とその応用シンポジウム, 2010 年 12 月, 長野
- ② Ryo NOMURA, Toshiyasu MATSUSHIMA, “On the Overflow Probability of Lossless Codes with Side Information,” 2010 IEEE International Symposium on Information Theory, 2010 年 6 月, Austin, USA
- ③ Ryo NOMURA, Toshiyasu MATSUSHIMA, “On the Overflow Probability of

Fixed-to-Variable Length Codes with Side Information,” 2010 Data Compression Conference, 2010 年 3 月, Snowbird, USA

- ④ Ryo NOMURA, Toshiyasu MATSUSHIMA, “A Note on the Second Order Separate Source Coding Theorem for Sources with Side Information,” 第 32 回情報理論とその応用シンポジウム, 2009 年 12 月, 山口
- ⑤ 野村亮, 松嶋敏泰, “相関のある情報源における符号化定理に関する一考察,” 第 7 回シャノン理論ワークショップ, 2009 年 9 月, 愛媛
- ⑥ 野村亮, 松嶋敏泰, “A Note on the Fixed-Length Coding Theorem for Sources with Side Information,” 電子情報通信学会情報理論研究会, 2009 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・講師

研究者番号: 90329102