

令和 3 年 6 月 11 日現在

機関番号：13904
研究種目：基盤研究(B)（一般）
研究期間：2018～2020
課題番号：18H01441
研究課題名（和文）ランダム行列理論を応用したレートレス符号化変調方式の創出

研究課題名（英文）Rateless Coded Modulation Based on Random Matrix Theory

研究代表者
竹内 啓悟（TAKEUCHI, Keigo）

豊橋技術科学大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：30549697
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 8,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の成果は2つある。1つ目の成果は、レートレス符号化変調方式の候補としてスパース重ね合わせ符号を検討し、スパース重ね合わせ符号の反復復号法として、期待値伝播法を提案したことである。
もう1つは、研究開始当初に想定外だった成果として、期待値伝播法の性能を理論的に厳密評価する方法を発展させて、既存の近似的メッセージ伝播法と期待値伝播法との利点を兼ね備えた新しいメッセージ伝播法を創出するための枠組みを開拓したことである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、既存のメッセージ伝播法の利点を兼ね備えたメッセージ伝播法の創出に向けて、メッセージ伝播法の新しい研究対象を切り開いた点にある。この方向の研究は、研究代表者の新規の基盤研究(B)として2025年度までの5年計画で実施する予定である。
本研究の社会的意義は、レートレス符号化変調方式の候補としてスパース重ね合わせ符号を提示した点にある。この方式が完成すれば、伝送速度の制御が自動化され、通信環境に応じた高速・大容量の情報通信を実現できる。

研究成果の概要（英文）：The contributions of this research are twofold: One contribution is the proposal of expectation propagation decoding for sparse superposition codes, which are a candidate of rateless coded modulation.
The other contribution was not planned at the beginning of this research. A new framework has been pioneered to develop novel message-passing algorithms that realize the advantage of both approximate message-passing and expectation propagation. The framework has been established by extending a theoretically rigorous method for evaluating the performance of expectation propagation.

研究分野：情報通信工学

キーワード：情報通信工学 情報理論 ランダム行列理論 符号化変調 メッセージ伝播法 近似的メッセージ伝播法 期待値伝播法

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

本研究課題の申請時の無線通信では、通信路の環境に応じて符号化や変調方式を切り替える適応変調によって、伝送レートの調節を行っていた。しかし、適応変調には、(i)符号化や変調方式の切り替え基準の設計は容易でない、(ii)切り替え失敗時に伝送レートの損失が大きい、という欠点があった。そのため、これらの適応変調の欠点を克服するレートレス符号化変調方式が求められていた。

2. 研究の目的

本研究課題の申請時における研究目的は、レートレス符号化変調方式の候補として、スパース重ね合わせ符号をレートレス化することであった。スパース重ね合わせ符号は、辞書行列として標準ガウス行列を用いた場合、近似的メッセージ伝播法による復号性能が情報理論的な限界を達成することが知られている。スパース重ね合わせ符号自体はレートレス化を意識して作られた符号でないものの、符号化および復号方法がレートレス化に適した構造を有している。

スパース重ね合わせ符号をレートレス化する際の課題は、辞書行列の構成方法と復号方法の収束特性にあった。辞書行列に関する課題は、符号器や復号器で必要となる時間および空間計算量の観点で実用的かつ高性能な辞書行列を構成することであった。辞書行列を理論上で最適な標準ガウス行列として構成することは、時間および空間計算量の観点で実用的でない。実用的な辞書行列として、ランダムな行置換を行ったアダマール行列を用いることが提案されていたが、その性能に関する理解は数値実験のみで理論的な検討は行われていなかった。そのため、実用的な辞書行列の性能を理論的に厳密解析することを当初の研究目的とした。

復号方法の課題は、通信路の変動に頑強な復号方法を確立することであった。近似的メッセージ伝播法には、通信路の影響を含めた実効的な辞書行列が標準ガウス行列でない限り、収束特性が著しく悪化するという欠点がある。無線通信路の影響で、辞書行列を理想的な標準ガウス行列として構成したとしても、実効的な辞書行列は標準ガウス行列ではなくなり、近似的メッセージ伝播法の性能は著しく悪化することになる。この欠点および実用的な辞書行列の使用を踏まえ、期待値伝播法による頑強な復号方法の確立を当初の目的とした。

3. 研究の方法

- (1) 辞書行列として、直交不変性を有するランダム行列を想定した。直交不変性とは、信号ベクトル側から任意の直交行列を辞書行列に乗算しても、辞書行列の統計的性質が変化しないという性質のことである。受信ベクトル側から直交行列を乗算した場合の直交不変性は、受信器で発生する加法的白色ガウス雑音の統計的性質から自然に誘導されるため、実質的に両側からの直交不変性を辞書行列に仮定することになる。

上記の仮定に加えて、信号ベクトルが独立同一分布した要素から成ることを想定して、期待値伝播法による復号器の定式化と状態発展法による性能評価を行った。スパース重ね合わせ符号の信号ベクトルは、本来セクションごとに分割される。異なるセクションに属する信号は独立であるものの、同一セクション内には非零要素は一つしかないという特殊な構造を持つ。したがって、同一セクション内では信号要素の独立同一分布性は成り立たないため、本仮定は期待値伝播法の性能を厳密評価するための理想化された仮定とみなすべきである。

- (2) 次に、期待値伝播法をスパース重ね合わせ符号の復号に応用した。その際、信号ベクトルが独立同一分布した要素を持つという仮定を弱め、同一セクション内では非零要素が1つしかないという仮定に緩和する必要がある。特に、セクションサイズを1に限定した場合には、信号要素が独立同一分布している場合に帰着するため、スパース重ね合わせ符号の信号ベクトルは、従来の独立同一分布した場合を含むことになる。この仮定の下で、従来の期待値伝播法の定式化を一般化し、スパース重ね合わせ符号に対する期待値伝播復号法を導出し、数値実験によって性能評価を行った。
- (3) 期待値伝播法の弱点を解消する新しいメッセージ伝播法を創出する研究にも着手した。この研究は研究開始当初に想定していなかった研究内容であるものの、期待値伝播法の性能解析方法を近似的メッセージ伝播法の解析に応用する過程で着想に至った。説明の都合上、具体的な内容については次節の研究成果でまとめる。

4. 研究成果

- (1) 近似的メッセージ伝播法の性能解析に用いられた状態発展法を拡張して、期待値伝播法の性能を厳密に解析した。近似的メッセージ伝播法とは、低計算量な整合フィルタを用いて、優れた復号特性を達成する反復復号アルゴリズムである。状態発展法による厳密解析から、辞書行列が標準ガウス行列の場合には、近似的メッセージ伝播法はベイズ統計学上で最良な復号性能を達成することが知られている。

信号ベクトルが独立同一分布した要素から成る場合を想定し、辞書行列に関する仮定を標準ガウス行列から直交不変性を有する行列に拡張して、状態発展法による期待値伝播法

の厳密な性能解析を行った。標準ガウス行列は直交不変性を有するため、直交不変性を有する辞書行列に関する結果は、従来の標準ガウス行列に関する結果を含むことになる。

状態発展法による解析において技術的な面で最も重要な手順は、現時点までで得られているメッセージを条件として固定した場合に、辞書行列の条件付き分布を評価する部分である。従来の標準ガウス辞書行列の場合には、条件付き分布はガウス分布になることは自明であった。しかし、直交不変性を有する辞書行列の場合には、特別な取り扱いが必要である。具体的には、辞書行列の特異値分解において、右特異ベクトルから成る直交行列がハール分布することを利用した。メッセージを条件として固定した場合に、このハール直交行列の条件付き分布がハール分布することを証明することで、辞書行列の条件付き分布を評価することに成功した。

状態発展法による厳密解析の結果、辞書行列が直交不変性を有する場合に、期待値伝播法はベイズ統計学上で最良な性能を漸近的に達成することを証明した。この成果は、標準ガウス行列の場合にのみベイズ最良性が保証される近似的メッセージ伝播法とは異なり、期待値伝播法は直交不変性を有するあらゆる辞書行列に対して、ベイズ最良であることを意味する。

本研究結果の意義は、直交不変性を有する辞書行列が、無線通信路の影響を考慮した上で、時間および空間計算量の観点で実効的な辞書行列を用いた場合の実効的な辞書行列の数理モデルとみなせる点にある。ハール直交行列は、ランダムな行置換を行った密な直交辞書行列の数理モデルとみなすことができる。ハール直交行列の受信ベクトル側からどんな行列を乗算しても、実効的な辞書行列の信号ベクトル側からの直交不変性は変わらないため、無線通信路を表現する行列がどんな行列であったとしても、実効的な辞書行列は直交不変なままである。

本研究結果は、互いに独立な研究成果として、偶然にも他国の研究グループと同一の国際会議で同一の内容を発表することとなった。期待値伝播法自体は21世紀初頭には提案されていたものの、その厳密な性能評価は長い間にわたって未解決な難問であった。本研究結果がメッセージ伝播法に関わる研究分野に一定のインパクトを与えたことは、Google Scholar Citationsによる被引用件数の集計結果から見て取れる。当該国際会議論文の被引用件数は、2017年に4件、2018年に14件、2019年に25件、2020年に30件と注目度が単調増加している。本研究結果が当該研究分野に浸透し、分野の研究進展に一定のインパクトを与えたことが分かる。

- (2) 信号ベクトルが独立同一分布した要素から成る場合の結果を拡張して、同一セクション内では非零要素が1つしかない場合に、期待値伝播法の定式化と数値実験による性能評価を実施した。信号ベクトルが独立同一分布した要素から成る場合の結果から、理論的な性能については結果が容易に予想できたため、状態発展法による具体的な証明は省略した。

最初に無線通信路の影響を考慮せず、受信器で生じる熱雑音の影響のみを考慮した。辞書行列としてランダムな行置換を行った離散フーリエ変換行列を使用し、従来の近似的メッセージ伝播復号法と期待値伝播復号法の性能を数値実験で比較した。当初の予想通り、2つのメッセージ伝播復号法はほとんど同一の性能を示した。この結果は、ランダムな行置換を行ったアダマール行列を用いた場合の近似的メッセージ伝播法の性能が、標準ガウス辞書行列を仮定した場合の状態発展法による性能解析結果とほぼ同等という既存結果とも合致している。

次に、広帯域な無線通信路を想定して直交周波数分割多重方式を用いた場合に、2つのメッセージ伝播復号法の性能を数値実験によって評価した。辞書行列は、前述のランダムな行置換を行った離散フーリエ変換行列を用いた。この場合の実効的な辞書行列は、元の辞書行列の受信ベクトル側から、サブキャリアごとの通信路利得に相当する値を対角成分に持つ対角行列を乗算した行列となる。ランダムな行置換を行った離散フーリエ変換行列がハール直交行列の実効的な代替行列とみなせると仮定すると、この実効的な辞書行列は直交不変性を満たし、期待値伝播復号法のベイズ最良性が保証される。

数値実験の結果、近似的メッセージ伝播法の性能は著しく悪化するのに対して、期待値伝播法は良好な復号性能を達成できることが分かった。したがって、期待値伝播復号法は無線通信路の影響に対して頑強な復号方法と言える。

- (3) 期待値伝播法の弱点は、低計算量な実装を行うために、一般に高計算量である実効的な辞書行列の特異値分解を計算する必要性にある。この弱点を解消する新しいメッセージ伝播法の創出に着手した。具体的には、直近のメッセージのみを使用する従来のメッセージ伝播法とは異なり、それまでに計算したすべてのメッセージを利用して現時点のメッセージを計算する点にある。直交不変性を有する辞書行列の場合の状態発展法による近似的メッセージ伝播法の解析結果から、このような新しいクラスのメッセージ伝播法の中に優れた性能を示すアルゴリズムが存在する可能性を見出した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 T. Sugiyama and K. Takeuchi	4. 巻 E104.A
2. 論文標題 Expectation-Propagation Detection for Generalized Spatial Modulation with Sparse Orthogonal Precoding	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Transactions. Fundamentals.	6. 最初と最後の頁 661 ~ 664
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transfun.2020EAL2066	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 H. Mayumi and K. Takeuchi	4. 巻 E103.A
2. 論文標題 Expectation Propagation Decoding for Sparse Superposition Codes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE Transactions. Fundamentals.	6. 最初と最後の頁 1666 ~ 1669
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transfun.2020EAL2053	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 T. Fujitsuka and K. Takeuchi	4. 巻 E103.A
2. 論文標題 Pilot Decontamination in Massive MIMO Uplink via Approximate Message-Passing	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE Transactions. Fundamentals.	6. 最初と最後の頁 1356 ~ 1366
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transfun.2020TAP0007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 K. Takeuchi	4. 巻 27
2. 論文標題 Convolutional Approximate Message-Passing	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Signal Process. Lett.	6. 最初と最後の頁 416 ~ 420
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LSP.2020.2976155	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Takeuchi	4. 巻 66
2. 論文標題 Rigorous Dynamics of Expectation-Propagation-Based Signal Recovery from Unitarily Invariant Measurements	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Trans. Inf. Theory	6. 最初と最後の頁 368 ~ 386
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TIT.2019.2947058	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 M. Yamada, K. Takeuchi, and K. Koike	4. 巻 E102.A
2. 論文標題 Hardware-Aware Sum-Product Decoding in the Decision Domain	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEICE Trans. Fundamentals.	6. 最初と最後の頁 1980 ~ 1987
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transfun.E102.A.1980	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 K. Takeuchi	4. 巻 E102.A
2. 論文標題 A Family of Counterexamples to the Central Limit Theorem Based on Binary Linear Codes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEICE Trans. Fundamentals.	6. 最初と最後の頁 738 ~ 740
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transfun.E102.A.738	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 K. Takeuchi	4. 巻 -
2. 論文標題 A Unified Framework of State Evolution for Message-Passing Algorithms	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. 2019 IEEE Int. Symp. Inf. Theory	6. 最初と最後の頁 151 ~ 155
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ISIT.2019.8849321	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計14件(うち招待講演 2件/うち国際学会 1件)

1. 発表者名 桑原悠太, 竹内啓悟, 山崎悟史
2. 発表標題 大規模な空間変調MIMO上り回線における近似的メッセージ伝播法
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 佐野裕大, 竹内啓悟
2. 発表標題 空間結合双線形推論問題に対する近似的メッセージ伝播法
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 K. Takeuchi
2. 発表標題 A Unified Framework of State Evolution for Message-Passing Algorithms
3. 学会等名 2019 IEEE Int. Symp. Inf. Theory (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹内啓悟
2. 発表標題 メッセージ伝播法を解析するための状態発展法の統一理論
3. 学会等名 第42回情報理論とその応用シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 白島大樹, 竹内啓悟
2. 発表標題 空間結合圧縮センシングにおける期待値伝播法に基づく信号再構成
3. 学会等名 第42回情報理論とその応用シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 眞弓大輝, 竹内啓悟
2. 発表標題 スパース重ね合わせ符号に対する近似的メッセージ伝播復号法と期待値伝播復号法の比較
3. 学会等名 第42回情報理論とその応用シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 辰野渉, 竹内啓悟
2. 発表標題 期待値伝播法に基づく大規模MIMO通信路とデータの反復同時推定
3. 学会等名 第42回情報理論とその応用シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平岡朋晟, 竹内啓悟
2. 発表標題 Trainable Sum-Product復号器の効率的深層学習法に関する初歩的検討
3. 学会等名 第42回情報理論とその応用シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹内啓悟
2. 発表標題 メッセージ伝播復調法の過去，現在，未来
3. 学会等名 電子情報通信学会衛星通信/無線通信システム研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 衣斐信介，竹内啓悟
2. 発表標題 近似的メッセージ伝播法を理解する - 通信と信号処理の立場から -
3. 学会等名 第41回情報理論とその応用シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 横内 証哉，竹内啓悟
2. 発表標題 共役勾配法による期待値伝播法の低計算量化
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 杉山達哉，竹内啓悟
2. 発表標題 直交かつ疎な線形観測からのメッセージ伝播法による信号再構成
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 藤塚拓実, 竹内啓悟
2. 発表標題 近似的メッセージ伝播法に基づくパイロット汚染の解消
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 山田瑞樹, 竹内啓悟, 小池清之
2. 発表標題 密度発展法に基づくSum Product復号のハードウェア実装に適した近似
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

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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