

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06064

研究課題名(和文) 通信における線形観測に基づく劣決定問題に関する研究

研究課題名(英文) Study on underdetermined linear systems in communications

研究代表者

林 和則 (Hayashi, Kazunori)

大阪市立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：50346102

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：未知ベクトルのもつスパース性や離散性を利用して、その劣決定線形観測から実際に観測された真の解を求める手法を開発し、通信の様々な問題に応用した。主な成果は次の通り。1) 劣決定線形観測から離散値ベクトルを再構成する低演算量のアルゴリズム開発(凸最適化と確率推論に基づく2つの手法)、2) 提案再構成法により完全再構成を達成するための条件の理論解析、3) 様々な通信の問題における提案アプローチの有効性の確認。

研究成果の概要(英文)：We have developed reconstruction methods of a (possibly sparse) discrete-valued vector from its underdetermined linear measurements, and applied the methods to various problems in communications. Main results are as follows. 1) development of low computational complexity reconstruction algorithms of a discrete-valued vector. 2) theoretical analysis on the condition for the perfect reconstruction via the proposed methods. 3) demonstrations of the effectiveness of the proposed approach through applications to various problems in communications.

研究分野：統計的信号処理

キーワード：離散値ベクトル スパース 劣決定線形システム 圧縮センシング 線形観測

### 1. 研究開始当初の背景

圧縮センシングは、線形観測における真の解がスパースである、すなわちその成分のほとんどが0である場合に、劣決定の連立一次方程式から実際に観測された真の解を求めることを可能にする数理的枠組みである。連立一次方程式による問題設定は基本的であり、また、現実世界において興味のある求めるべき未知ベクトルの多くにスパース性が仮定できることから、様々な分野の問題に圧縮センシングのアイデアが応用されている。さらに最近、未知ベクトルを確率変数とみなして劣決定の線形観測プロセスを情報理論のアナログデータ圧縮の問題と捉えることで、レニー情報次元に基づく議論によって、スパースベクトルだけでなく離散値ベクトルも劣決定の連立一次方程式から完全再構成が可能であることが示された。現代の通信システムはそのほとんどがベースバンド変調方式にQPSK, QAMなどの離散の信号点をもつ信号を採用しているため、これは特に情報通信分野にとって非常に大きなインパクトがある結果である。ただし、レニー情報次元に基づく再構成の議論では雑音に対する耐性が考慮されておらず、また、観測行列が特別な構造をもつ場合しかその理論限界を達成可能な再構成アルゴリズムが知られていないため、実際の応用ではこれらの問題を解決する必要がある。

### 2. 研究の目的

信号のスパース性や離散性を利用して線形観測に基づく劣決定系の連立方程式の真の解を求める数的手法を、通信システムの種々の問題に適用することで、これまで十分な理解が得られていなかった通信の問題や現象を取扱うための理論的な枠組みを構築する。さらに、スパース性と離散性の両方を直接的に利用した、これまでにない全く新しい通信方式の実現を目指す。

### 3. 研究の方法

(1) 離散値ベクトルを解にもつ大規模劣決定系線形方程式の解法  
有限のアルファベットの劣決定線形観測からの最適信号検出法として古典的な最尤推定に基づく手法が知られているが、その膨大な計算量から適用可能範囲が小規模なシステムに限定されていた。また、情報理論的な圧縮センシングとして知られているレニー情報次元に基づく離散値ベクトル再構成では、空間結合行列と呼ばれる特別なクラスの観測行列に対して有効な解法が知られているが、一般の係数行列に対する手法はまだ知られていない。そこで、最近提案された凸最適化に基づく離散値ベクトルの再構成法であるSOAV(sum-of-absolute value)最適化の手法に着目し、この手法を通信の諸問題に適用するための拡張(加法的観測雑音の影響の考慮、各シンボルの事前情報の考慮)を検

討した。また、スパースベクトルの再構成アルゴリズムの一つである確率推論に基づく近似メッセージパッシング(AMP)のアイデアを用いることで、より要求演算量の低い最高性アルゴリズムを検討した。

#### (2) SOAV最適化による離散値ベクトル再構成の理論精度保証

劣決定の線形観測から未知ベクトルを再構成するための条件は、未知ベクトルがスパースの場合については多くの研究がなされているが、離散値ベクトルの場合にはほとんど知られていなかった。どの程度の線形観測があれば未知の離散値ベクトルが再構成できるかという情報は応用上極めて重要であるため、これについて理論解析を行った。まず、基本的な解析として、圧縮センシングでよく知られている制限等長性(RIP)に基づく理論解析を行った。さらに、応用上使いやすい結果を得るために、AMPに基づくアルゴリズムを使用したときの大システム極限における完全再構成の条件を、状態発展法の議論に基づいて導出した。

#### (3) 離散値ベクトル再構成の通信応用

通信の様々な問題を、劣決定の線形観測からの離散値ベクトルの再構成劣決定の線形観測からの離散値ベクトルの再構成問題として定式化し、SOAV最適化による提案離散値ベクトル再構成アルゴリズムを適用することで、従来手法を大幅に上回る特性を達成する手法を開発した。

### 4. 研究成果

#### (1) 離散値ベクトルを解にもつ大規模劣決定系線形方程式の解法

オリジナルのSOAV最適化の手法では雑音の影響が考慮されていなかったが、圧縮センシングのLassoや $l_1$ - $l_2$ 最適化のアイデアを利用することで通信の問題で不可避な雑音の影響を考慮可能な手法に拡張し、近接分離法を用いたその解法アルゴリズムを提案した。さらに、SOAV最適化の重み係数を更新しながら繰り返すIW-SOAV(iterative weighted SOAV)に拡張し、各シンボルの不均一な事前確率などの情報を取り込むことが可能な再構成手法を開発した。さらに、スパースベクトル再構成のためのAMPアルゴリズムの導出における議論を、SOAV最適化に適用することで、 $O(n^2)$ の計算量の再構成アルゴリズムの導出に成功した(近接分離による手法は逆行列演算を含むため $O(n^3)$ )。

#### (2) SOAV最適化による離散値ベクトル再構成の理論精度保証

RIPを用いることで圧縮センシングと同様に、離散値ベクトルの再構成の場合にも完全再構成の十分条件を与えることに成功した。また、大システム極限を仮定した状態発展法による解析により、(大システムにおいて)完全再構成を実現するための観測数と離散値レベル数の関係を導出し、システムサイズが

数百程度あればこの理論限界とほぼ一致する特性が得られることを確認した。さらに、状態発展法の解析結果に基づいて、各ステップでの更新で二乗誤差が最小になるような写像を用いるベイズ最適と呼ばれるAMPアルゴリズムを導出し、その有効性を計算機実験で確認した。ベイズ最適AMPでは状態発展法による特性の理論解析が適用できないが、弱閾値関数を用いる基本的な手法に比べて大幅な特性の改善が得られた。

(3) 離散値ベクトル再構成の通信応用  
様々な通信の問題に適用し、従来手法を上回る特性を達成することができた。具体的には、送信アンテナ数（正確には送信ストリーム数）よりも受信アンテナ数が少ないMIMO信号伝送（過負荷MIMO）、ナイキスト条件を満足するために必要な伝送速度よりも早いレートで信号伝送を行うFTN (Faster-than-Nyquist)伝送のための信号検出、CDMA信号の最大事後確率に基づくマルチユーザ信号検出、過負荷MIMOにおける時空間符号の復号アルゴリズム、大量のIoTノードからの信号を同時に受信可能なマルチユーザMIMO信号検出などに適用し、その有効性を確認した。提案離散値ベクトル再構成アルゴリズムは、従来法が計算量的に破綻してしまうようなシステムサイズ（未知ベクトルの次元が数百程度）であっても現実的な演算量で動作可能であり、また、特にシステムサイズが大きな領域で良好な特性を達成するため、これまで実現が不可能であったような領域でのシステム設計の可能性を大きく広げたことは特筆すべきことである。さらに、IoT環境のようにすべての端末がアクティブでないような状況では、信号の離散性とスパース性の両方を活用することでスパース性のみを利用する手法に比べて特性を改善することができ、提案法はスパース性のみを考える圧縮センシングの一般化になっている。

#### 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 8 件)

1. Q. Dong, K. Hayashi, and M. Kaneko, "An Optimized Link Layer Design for Communication-based Train Control Systems using WLAN," *IEEE Access*, 査読有, vol. 6, 2018, pp. 6865-6877, DOI : 10.1109/ACCESS.2017.2763173.
2. R. Hayakawa and K. Hayashi, "Error Recovery for Massive MIMO Signal Detection via Reconstruction of Discrete-Valued Sparse Vector," *IEICE Transactions on Fundamentals*, 査読有, Vol. E100-A, No. 12, 2017, pp. 2671-2679, DOI : 10.1587/transfun.E100.A.2671.
3. R. Hayakawa and K. Hayashi, "Convex

Optimization Based Signal Detection for Massive Overloaded MIMO Systems," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 査読有, Vol. 16, No. 11, 2017, pp. 7080-7091, DOI : 10.1109/TWC.2017.2739140.

4. H. Sasahara, K. Hayashi, and M. Nagahara, "Multiuser Detection based on MAP Estimation with Sum-of-Absolute-Values Relaxation," *IEEE Transactions on Signal Processing*, 査読有, Vol.65, No. 21, 2017, pp. 5621-5634, DOI : 10.1109/TSP.2017.2740164.
5. M. Kaneko, T. Nakano, K. Hayashi, T. Kamenosono and H. Sakai, "Distributed Resource Allocation with Local CSI Overhearing and Scheduling Prediction for OFDMA Heterogeneous Networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 査読有, Vol. 66, No. 2, 2017, pp. 1186-1199, DOI : 10.1109/TVT.2016.2555840.
6. H. Sasahara, K. Hayashi, and M. Nagahara, "Symbol Detection for Faster-than-Nyquist Signaling by Sum-of-Absolute-Values Optimization," *IEEE Signal Processing Letters*, 査読有, Vol. 23, No. 12, 2016, pp. 1853-1857, DOI : 10.1109/LSP.2016.2625839.
7. R. Hayakawa, K. Hayashi, and M. Kaneko, "Lattice Reduction-Aided Detection for Overloaded MIMO using Slab Decoding," *IEICE Transactions on Communications*, 査読有, vol.E99-B, No.8, 2016, pp. 1697-1705, DOI : 10.1587/transcom.2015CCP0014.
8. T. Kamenosono, M. Kaneko, K. Hayashi, and Lila Boukhatem, "Self-Organized Inter-Cell Interference Coordination Based on Partial CSI Sharing in Heterogeneous Networks Employing Cell Range Expansion," *IEICE Transactions on Communications*, 査読有, vol.E99-B, No.8, 2016, pp. 1780-1788, DOI : 10.1587/transcom.2015CCP0032.

〔学会発表〕(計 44 件)

1. R. Hayakawa, K. Hayashi, "Distributed Approximate Message Passing with Summation Propagation," 2018 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP 2018), 2018.
2. A. Nakai, K. Hayashi, "An Adaptive Combination Rule for Diffusion LMS based on Consensus Propagation," 2018 IEEE International Conference on

- Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP 2018), 2018.
3. 河 翔碩, 中井彩乃, 林 和則, “信号の離散性を利用したIoT環境のための上りリンク過負荷 MU-MIMO OFDM 信号検出法,” 電子情報通信学会総合大会, 2018.
  4. 河 翔碩, 中井彩乃, 林 和則, “凸最適化を用いた上りリンク過負荷 MU-MIMO OFDM 信号検出法,” 電子情報通信学会無線通信システム研究会, 2018.
  5. 早川 諒, 中井彩乃, 林 和則, “総和伝搬法を用いた分散近似メッセージ伝搬アルゴリズム,” 電子情報通信学会信号処理研究会, 2018.
  6. R. Hayakawa, K. Hayashi, “Binary Vector Reconstruction via Discreteness-Aware Approximate Message Passing,” 2017 APSIPA Annual Summit and Conference (APSIPA ASC 2017), 2017.
  7. A. Nakai, K. Hayashi, “Diffusion LMS Using Consensus Propagation,” 2017 APSIPA Annual Summit and Conference (APSIPA ASC 2017), 2017.
  8. L. Yujia, K. Hayashi, “A New Pool Control Method for Boolean Compressed Sensing Based Adaptive Group Testing,” 2017 APSIPA Annual Summit and Conference (APSIPA ASC 2017), 2017.
  9. 曹 越池, 林 和則, “通信路情報誤差を考慮したマルチウェイ中継ネットワークにおける ミニマックス法による任意ユニキャスト伝送,” 電子情報通信学会高信頼制御通信研究会, 2017.
  10. M. Kaneko, T. Kamenosono, K. Hayashi, “Dynamic ICIC for Post-Scheduling Outage Probability Minimization in Small Cell Networks,” 2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC2017-Fall), 2017.
  11. 中井彩乃, 林 和則, “ループを含むグラフ上での合意伝搬法を利用した拡散 LMS アルゴリズム,” 電子情報通信学会 2017 ソサイエティ大会, 2017
  12. Y. Cao, K. Hayashi, “Robust Arbitrary Unicast Transmission over Multi-way Relay Channel with CSI Error,” 電子情報通信学会 2017 ソサイエティ大会, 2017.
  13. L. Yujia, K. Hayashi, “A Pool Control Method for Adaptive Group Testing with Boolean Compressed Sensing,” 電子情報通信学会高信頼制御通信研究会, 2017.
  14. Q. Dong, K. Hayashi, M. Kaneko, “Adaptive Modulation and Coding Design for Communication-Based Train Control Systems Using IEEE 802.11 MAC with RTS/CTS,” The 18th IEEE International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC 2017), 2017.
  15. R. Hayakawa, K. Hayashi, “Discreteness-Aware AMP for Reconstruction of Symmetrically Distributed Discrete Variables,” The 18th IEEE International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC 2017), 2017.
  16. 細野貴士, 林 和則, “QAM 信号の BER 不均一性を利用した状態フィードバック通信のための符号化法,” 電子情報通信学会高信頼制御通信研究会, 2017.
  17. 中井彩乃, 林 和則, “合意伝搬法を用いた拡散 LMS アルゴリズム,” 電子情報通信学会総合大会, 2017.
  18. 早川 諒, 林 和則, “離散値ベクトル再構成のための近似メッセージ伝搬アルゴリズム,” 電子情報通信学会信号処理研究会, 2017.
  19. H. Mukumoto, K. Hayashi and M. Kaneko, “Direction-Of-Arrival Estimation via Khatri-Rao Subspace Using Compressed Sensing,” 2016 APSIPA Annual Summit and Conference (APSIPA ASC 2016), 2016.
  20. Y. Cao, K. Hayashi and F. Wang, “Arbitrary Unicast Transmission over MIMO Multi-way Relay Channel with Imperfect CSI,” 2016 APSIPA Annual Summit and Conference (APSIPA ASC 2016), 2016.
  21. L. Yujia, K. Hayashi, “A New Pool Size Control Method for Boolean Compressed Sensing Based Adaptive Group Testing,” 電子情報通信学会高信頼制御通信研究会, 2016.
  22. R. Hayakawa, K. Hayashi, “Error Recovery with Relaxed MAP Estimation for Massive MIMO Signal Detection,” 2016 International Symposium on Information Theory and Its Applications (ISITA 2016), 2016.
  23. Q. Dong, K. Hayashi, M. Kaneko, “An Adaptive Modulation and Coding scheme for Communication-Based Train control systems using WLAN,” 電子情報通信学会第 2 回 CQ 基礎講座ワークショップ, 2016.
  24. Q. Dong, K. Hayashi, M. Kaneko, “Performance Evaluation of Adaptive Modulation and Coding Scheme for WLAN based Communication-Based Train Control Systems,” 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, 2016.
  25. Q. Dong, K. Hayashi, M. Kaneko, “A New Adaptive Modulation and Coding Method

- for Communication-Based Train Control Systems Using WLAN," The 6th IFAC Workshop on Distributed Estimation and Control in Networked Systems, 2016.
26. R. Hayakawa, K. Hayashi, H. Sasahara and M. Nagahara, "Massive Overloaded MIMO Signal Detection via Convex Optimization with Proximal Splitting," 2016 European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2016), 2016.
  27. 香月諒大, 金子めぐみ, 林 和則, "クラウド無線アクセスネットワークのためのフロントホール制約を考慮したビームフォーミング法の一検討," 電子情報通信学会コミュニケーションクオリティ研究会, 2016.
  28. L. Yujia, K. Hayashi, "Cardinality Estimation of Positive Items for Boolean Compressed Sensing Based Adaptive Group Testing," 電子情報通信学会高信頼制御通信研究会, 2016.
  29. H. Sasahara, K. Hayashi, M. Nagahara, and Y. Yamamoto, "Control Theoretical Approach for Single-Frequency Full-Duplex Wireless Relaying," The 22nd International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems (MTNS), 2016.
  30. Q. Dong, K. Hayashi, M. Kaneko, T. Kamenosono, "An Adaptive Modulation and Coding Scheme for Communication-Based Train Control Systems with CSMA/CA," 第60回システム制御情報学会研究発表講演会(SCI'16), 2016.
  31. H. Sasahara, K. Hayashi, and M. Nagahara, "Multiuser Detection by MAP Estimation with Sum-of-Absolute-Values Relaxation," 2016 IEEE International Conference on Communications (ICC 2016), 2016.
  32. 早川 諒, 林 和則, "凸最適化を用いた MIMO 信号検出法の実験評価," 電子情報通信学会高信頼制御通信研究会, 2016.
  33. 亀之園卓也, 金子めぐみ, 林 和則, Lila Boukhatem, "セルレンジ拡張を用いた HetNet のための通信路情報共有に基づく半自律分散型セル間干渉制御法," 電子情報通信学会高信頼制御通信研究会, 2016.
  34. R. Hayakawa, K. Hayashi, M. Kaneko, "A Study on Overloaded MIMO Signal Detection Using Slab Decoding and Lattice Reduction," 電子情報通信学会信号処理専門委員会, 2016.
  35. R. Kawasaki, K. Hayashi, and M. Kaneko, "Pool Size Control for Adaptive Group Testing via Boolean Compressed Sensing with Solution Space Reduction," 2015 APSIPA Annual Summit and Conference (APSIPA ASC 2015), 2015.
  36. H. Sasahara, K. Hayashi, and M. Nagahara, "Time-Domain Equalization for Single-Frequency Full-Duplex Wireless Relay Using H2 Optimal Control," The 47th International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications (SSS '15), 2015.
  37. 早川 諒, 林 和則, 笹原帆平, 永原正章, "近接分離による凸最適化を用いた大規模過負荷 MIMO 信号検出法," 第38回情報理論とその応用シンポジウム(SITA2015), 2015.
  38. R. Hayakawa, K. Hayashi, and M. Kaneko, "An Overloaded MIMO Signal Detection Scheme with Slab Decoding and Lattice Reduction," The 21st Asia-Pacific Conference on Communications (APCC 2015), 2015.
  39. T. Kamenosono, M. Kaneko, K. Hayashi, and L. Boukhatem, "Self-Organized Resource Allocation Based on CSI Overhearing in Heterogeneous Networks Employing Cell Range Expansion," The 21st Asia-Pacific Conference on Communications (APCC 2015), 2015.
  40. 早川 諒, 林 和則, 笹原帆平, 永原正章, "送信シンボルの離散性を利用した大規模過負荷 MIMO 信号検出法," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2015.
  41. 亀之園卓也, 金子めぐみ, 林 和則, Lila Boukhatem, "セルレンジ拡張を用いた HetNet のための部分通信路情報共有に基づく自律分散型リソース割り当て法," 電子情報通信学会コミュニケーションクオリティ研究会, 2015.
  42. 笹原帆平, 永原正章, 林 和則, 山本 裕, "H2 最適制御に基づく MMSE 基準時間領域等化を用いた単一周波数全二重無線中継," 電子情報通信学会高信頼制御通信研究会, 2015.
  43. 早川 諒, 林 和則, 金子めぐみ, "スラブ復号と格子基底縮小を用いた低演算量な過負荷 MIMO 信号検出法," 電子情報通信学会高信頼制御通信研究会, 2015.
  44. 亀之園卓也, 金子めぐみ, 林 和則, "Cell Range Expansion を適用したヘテロジニアスネットワーク下りリンクのための通信路情報オーバーヒアに基づく分散リソース割り当て法の一検討," 電子情報通信学会無線通信システム研究会, 2015.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

林 和則 (HAYASHI, Kazunori)  
大阪市立大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：50346102

##### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

##### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：

##### (4) 研究協力者

( )