

平成 30 年 6 月 7 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H02252

研究課題名(和文)大規模アナログ結合を有する2部グラフ理論の確立

研究課題名(英文)Analysis of a large-scale bipartite factor graph with analog coupling

研究代表者

大鐘 武雄 (Takeo, Ohgane)

北海道大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：10271636

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,400,000円

研究成果の概要(和文)：複雑な問題を簡単な問題の積に分解し、各小問題を解きながら互いに信頼度情報を交換し、グローバルな解を求める方法がある。信頼度情報交換の際、ループがあると特性が劣化する。しかし、問題の規模が十分大きければ、正しい結果が得られる場合が多い。本課題では、種々の条件下で信頼度情報の動作を調べ、規模が大きいほど信頼性の低い情報による悪影響が軽減されることを確認した。その上で、信頼性の低い情報の影響を軽減する情報加工法を開発したとともに、その加工法が別の最適化理論からも導出できることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：It is known that we can obtain the global solution of a complex problem by decomposing it into multiple sub-problems and solving the small problems with exchanging the partial solution (reliability information) among them. The correct solution may not be obtained when some reliability exchange loops exist. However, an exception, i.e., an appropriate convergence can be seen if the problem size is very large. In this project, we tried many tests under various situations and obtained the fact that the effect of incorrect reliability propagation decreases with the problem size. From this results, we have succeeded developing a method adjusting the reliability information. In addition, the validity of the obtained method has been confirmed by another optimization approach.

研究分野：無線通信, 信号処理

キーワード：確率伝搬法 一般化確率伝搬法 近似的メッセージ交換法 圧縮センシング 大規模MIMO

1. 研究開始当初の背景

多変数の関数を少変数の関数の積で表現できるとき、各関数を解きながら、部分解の情報を互いに交換し、最終的にグローバルな解を得る手法がある。各関数間の関係を図で表したものがファクターグラフであり、各関数・変数に対応するノードと、互いの関係を示すエッジと呼ばれる線で構成されている。LDPCにおけるSum Product復号法はこのファクターグラフを用いた解法としてよく知られている。

一般に、ファクターグラフ内にループが存在すると適切に収束しない場合があることが知られている。しかし、MIMOの信号検出をファクターグラフで表した場合、ループが多数存在するにもかかわらず(図1)、ノード数が多ければ適切に収束する例が見られた。この事実は注目されず、その動作について踏み込んだ研究も皆無であった。

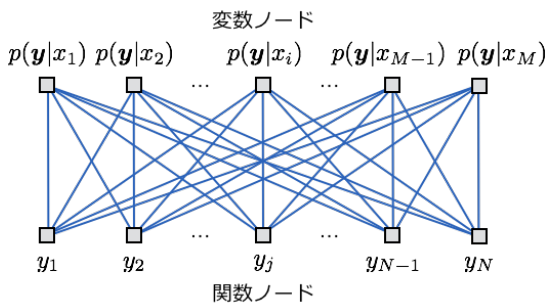


図1 MIMO 信号検出のファクターグラフ

2. 研究の目的

図1のようなファクターグラフでも規模によっては収束する理由を解明すれば、大規模なファクターグラフに関する新たな理論を確立できる可能性がある。本課題は、この問題に興味を持った4大学の研究者が集い、様々なアプローチから理論確立を試みることを目的としている。

3. 研究の方法

多数の信号検出を行う問題には種々の例がある。ファクターグラフを用いた解法の中で、計算量が少なく現実的な手法がGaBPと呼ばれるものである。これは、関数ノードで観測される信号中に含まれる全信号を同時に解くのではなく、対象とする信号以外をガウス近似して同時に解く際の周辺化計算を省略する手法である。本課題ではGaBPに着目し、種々の問題に適用した。

前述の通り、ループが多数あるグラフでは、規模が小さいときに収束しない場合がある。これを補償する手法として、伝搬するLLRの加工が知られている。具体的には、収束しない場合によく見られるLLRの振動を抑えるため、LLRに1次IIR低域通過フィルタをかけるものである(制振)。本課題では、制振以外の加工法の検討、および加工することの意義の確認を行った。

一方、多数信号の検出において、圧縮センシングを応用したものがある。圧縮センシングは、劣決定問題において解のほとんどがゼロである

スパースな条件のとき、正しい解が得られることを利用したものである。その解法の一つに近似的メッセージ交換法(AMP)がある。AMPもまたファクターグラフに基づいており、GaBPと異なる出発点ながら、GaBPと似た構成になることが興味深い。本課題では、AMPからのアプローチで大規模ファクターグラフの特性解析を行なった。

最後に、ファクターグラフの理論的検討から、ループ数を減少させるグラフの三角化や、ループを完全に除去して木構造に改変する一般化確率伝搬法についても検討を行なった。

4. 研究成果

規模が小さい、あるいは、グラフ構造のランダム性が乏しい劣悪な環境において、伝搬するLLRの中に極めて大きな誤り(外れ値)が存在すると、他の信頼性を損ない、LLRが振動する現象が見られる。

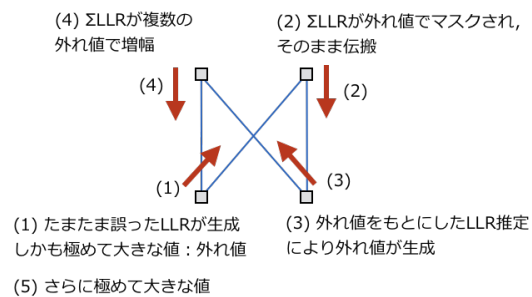


図2 外れ値による振動

このような場合に、従来の制振の他に、伝搬するLLRに上限を設ける手法も有効であることがわかった。さらに、適応的にLLRのスケールリングを行うと厳しい条件でも正しく収束することがわかった。

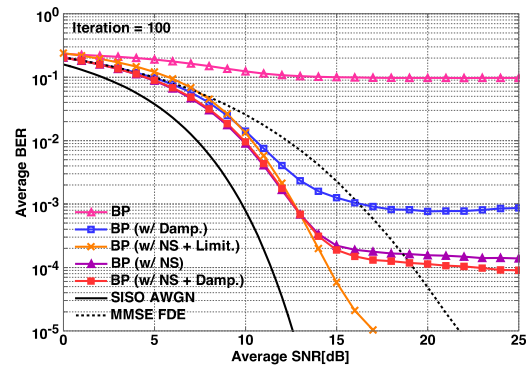


図3 適応等化における上限設定(Limiting)の効果

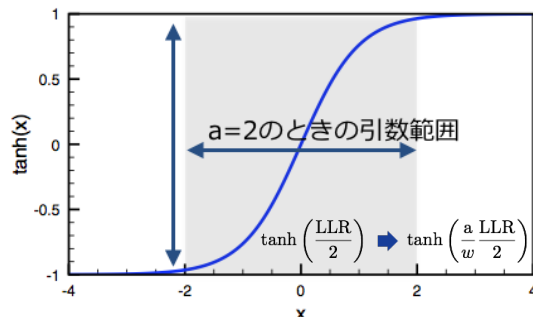


図4 適応スケールリングの概念

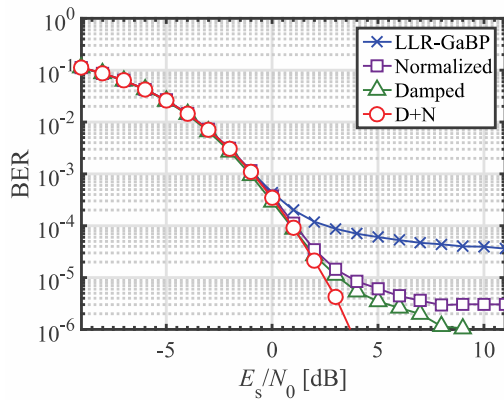


図5 適応スケーリングの特性例 (16 x 8 MIMO, N がスケーリング)

このように LLR を加工することは、すでにファクターグラフの解法が理想的でないことを意味する。すなわち、正しい LLR が伝搬していない。ループがある場合は外れ値の影響が避けられないため、理想的な解法から逸脱するとしても、より適切な情報を伝搬させるべきであると言える。

このことは、AMP からのアプローチでも見ることができた。信号の離散性を利用した AMP を用いて過負荷 MIMO の検出を行なった場合、近接作用素の Bays 最適化により大きく特性が改善すること、そして、この最適化により得られた近接作用素が図 4 の適応スケーリングと同様となることがわかった。

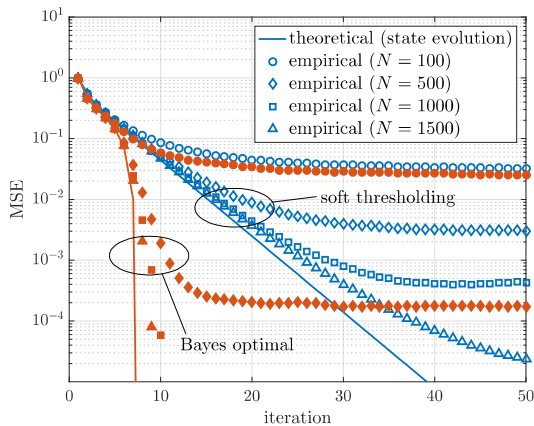


図6 過負荷 MIMO での AMP を利用した検出次の MSE 特性例

これらから、ループの多いファクターグラフでの適切な伝搬情報生成に、ある種の加工が非常に有効であり、もはや確率伝搬という呼び名ではなく、信念伝搬ともいべき曖昧なものであることが明らかとなった。

最後に、三角化や、一般化確率伝搬法による特性改善が見られたことは、ループの削減が適切な収束に重要であることの証であることが再確認された。今後は、より簡易なグラフ構造変更手法についても検討すべきである。

## 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)

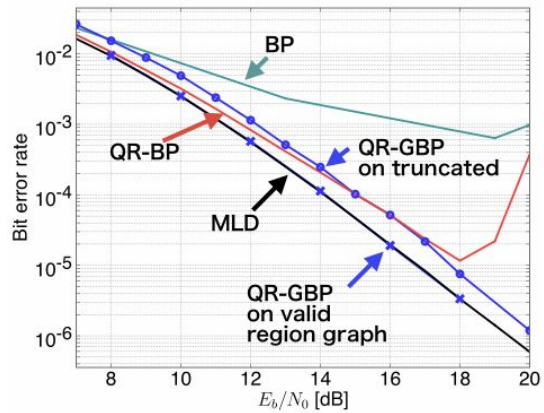


図7 三角化 (QR-BP) と一般化確率伝搬法 (QR-GBP) による特性改善例

[雑誌論文] (計 7 件)

- (1) R. Hayakawa and K. Hayashi, "Error Recovery for Massive MIMO Signal Detection via Reconstruction of Discrete-Valued Sparse Vector," *IEICE Trans. Fundamentals*, vol. E100-A, no. 12, pp. 2671-2679, Dec. 2017. 査読有  
DOI: 10.1587/transfun.E100.A.2671
- (2) H. Sasahara, K. Hayashi, and M. Nagahara, "Multiuser Detection based on MAP Estimation with Sum-of-Absolute-Values Relaxation," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 65, no. 21, pp. 5621-5634, Nov. 2017. 査読有  
DOI: 10.1109/TSP.2017.2740164
- (3) R. Hayakawa and K. Hayashi, "Convex Optimization Based Signal Detection for Massive Overloaded MIMO Systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 16, no. 11, pp. 7080-7091, Aug. 2017. 査読有  
DOI: 10.1109/TWC.2017.2739140
- (4) S. Tanno, T. Nishimura, T. Ohgane, and Y. Ogawa, "Serial and Parallel LLR Updates Using Damped LLR for LDPC Coded Massive MIMO Detection with Belief Propagation," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E100-B, no. 8, pp. 1277-1284, Aug. 2017. 査読有  
DOI: 10.1587/transcom.2016FGP0012
- (5) M. Hagiwara, T. Nishimura, T. Ohgane, and Y. Ogawa, "Node Selection for Belief Propagation Based Channel Equalization," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E100-B, no. 8, pp. 1285-1292, Aug. 2017. 査読有  
DOI: 10.1587/transcom.2016FGP0015
- (6) H. Sasahara, K. Hayashi, and M. Nagahara, "Symbol Detection for Faster-than-Nyquist Signaling by Sum-of-Absolute-Values Optimization," *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 23, no. 12, pp. 1853-1857, Nov. 2016. 査

読有

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 Trans. Commun. vol. E99-B, no.8, pp. 1697-1705, Aug. 2016. 査読有  
DOI: 10.1587/transcom.2015CCP0014

〔学会発表〕(計 86 件)

- (1) R. Hayakawa and K. Hayashi, "Distributed Approximate Message Passing with Summation Propagation," IEEE ICASSP 2018, Apr. 2018.
- (2) A. Nakai and K. Hayashi, "An Adaptive Combination Rule for Diffusion LMS based on Consensus Propagation," IEEE ICASSP 2018, Apr. 2018.
- (3) A. Nakai and K. Hayashi, "Diffusion LMS Using Consensus Propagation," APSIPA ASC 2017, Dec. 2017.
- (4) R. Hayakawa and K. Hayashi, "Binary Vector Reconstruction via Discreteness-Aware Approximate Message Passing," APSIPA ASC 2017, Dec. 2017.
- (5) T. Takahashi, S. Ibi, and S. Sampei, "Design of Adaptively Scaled Belief in Large MIMO Detection for Higher-Order Modulation," APSIPA ASC 2017, Dec. 2017.
- (6) A. D. Shigyo and K. Ishibashi, "QR-Decomposed Generalized Belief Propagation with Smart Message Reduction for Low-Complexity MIMO Signal Detection," APSIPA ASC 2017, Dec. 2017.
- (7) K. Kihara, T. Nishimura, T. Ohgane, and Y. Ogawa, "Signal Detection with Belief Propagation in Faster-than-Nyquist Signaling," APSIPA ASC 2017, Dec. 2017.
- (8) T. Takahashi, S. Ibi, and S. Sampei, "Criterion of Adaptively Scaled Belief for PDA in Overloaded MIMO Channels," Asilomar 2017, Oct. 2017.
- (9) R. Hayakawa and K. Hayashi, "Discreteness-Aware AMP for Reconstruction of Symmetrically Distributed Discrete Variables," IEEE SPAWC 2017, July 2017.
- (10) S. Ibi and S. Sampei, "Data Associated Iterative Channel Estimations with Non-Orthogonal Pilot for Large MIMO Detections," IEEE SPAWC 2017, July 2017.

など

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕  
出願状況 (計 0 件)  
取得状況 (計 0 件)

〔その他〕  
特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者  
大鐘 武雄 (OHGANE, Takeo)  
北海道大学・大学院情報科学研究科・教授  
研究者番号: 10271636

(2) 研究分担者  
西村 寿彦 (NISHIMURA, Toshihiko)  
北海道大学・大学院情報科学研究科・准教授  
研究者番号: 70301934

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

衣斐 信介 (IBI, Shinsuke)  
大阪大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 10448087

石橋 功至 (Ishibashi, Koji)  
電気通信大学・先端ワイヤレス・コミュニケーション研究センター・准教授  
研究者番号: 80452176

(3) 連携研究者  
なし

(4) 研究協力者  
なし