

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

|                   |                                                                                                                                                                             |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 題目(和文)            | 1ビット圧縮センシングの統計力学的解析                                                                                                                                                         |
| Title(English)    | Statistical mechanics approach to 1-bit compressed sensing                                                                                                                  |
| 著者(和文)            | 許インイン                                                                                                                                                                       |
| Author(English)   | yingying xu                                                                                                                                                                 |
| 出典(和文)            | 学位:博士(理学),<br>学位授与機関:東京工業大学,<br>報告番号:甲第10102号,<br>授与年月日:2016年3月26日,<br>学位の種別:課程博士,<br>審査員:樺島 祥介,渡邊 澄夫,高安 美佐子,石井 秀明,青西 亨                                                     |
| Citation(English) | Degree:,<br>Conferring organization: Tokyo Institute of Technology,<br>Report number:甲第10102号,<br>Conferred date:2016/3/26,<br>Degree Type:Course doctor,<br>Examiner:,,,,, |
| 学位種別(和文)          | 博士論文                                                                                                                                                                        |
| Category(English) | Doctoral Thesis                                                                                                                                                             |
| 種別(和文)            | 審査の要旨                                                                                                                                                                       |
| Type(English)     | Exam Summary                                                                                                                                                                |

論文審査の要旨及び審査員

| 報告番号            | 甲第  | 号     | 学位申請者氏名 | 許インイン |     |     |
|-----------------|-----|-------|---------|-------|-----|-----|
| 論文審査<br><br>審査員 |     | 氏 名   | 職 名     |       | 氏 名 | 職 名 |
|                 | 主査  | 樺島祥介  | 教授      | 審査員   | 青西亨 | 准教授 |
|                 | 審査員 | 渡辺澄夫  | 教授      |       |     |     |
|                 |     | 高安美佐子 | 准教授     |       |     |     |
|                 |     | 石井秀明  | 准教授     |       |     |     |

論文審査の要旨（2000 字程度）

本論文は「Statistical mechanics approach to 1-bit compressed sensing (1 ビット圧縮センシングの統計力学的解析)」と題し、英文 5 章から構成されている。

第 1 章「Introduction」では、論文の主題となる 1 ビット圧縮センシングの背景について記している。はじめに、信号処理に関する従来理論の基礎をなす標本化定理について説明している。次いで、対象信号が疎な（ゼロ成分が多い）場合に、標本化定理の限界を越えて信号処理の効率化を図る枠組みが圧縮センシングと呼ばれ、その応用範囲がコンピュータ断層撮影、天体観測、無線チャンネル推定など多岐にわたることを述べている。その上で、圧縮センシングの研究には、大別して性能評価およびアルゴリズム開発の 2 つの論点があることを指摘し、本論文の目的は、観測結果の符号情報のみから信号復元を行う 1 ビット圧縮センシングに関して、さまざまな状況での性能評価を行うこと、ならびに、効率的な信号復元アルゴリズムを開発することであると記している。加えて、第 2 章以降の論文の構成について説明している。

第 2 章「 $\ell_1$ -norm minimization approach」では、1 ビット標本値との整合性を拘束条件とした  $\ell_1$ -ノルムの最小化によって信号を復元する方法について検討している。まず、Boufounos and Baranuik による先行研究の中で提案された、符号情報へ圧縮する際に失われる信号の振幅情報を  $\ell_2$ -ノルムに関する制約で補完する信号復元法に着目し、その性能を統計力学のレプリカ法を用いて評価している。加えて、統計力学のキャビティ法に発見法的な工夫を加えることで新規な信号復元アルゴリズムを構成し、数値実験により、提案アルゴリズムが Boufounous and Baranuik によるアルゴリズムよりも優れた信号復元性能を有していることを示している。

第 3 章「Thresholding  $\ell_1$ -norm minimization」では、信号の観測過程に閾値を導入することで振幅情報の消失を防ぐ 1 ビット圧縮センシングの方法について検討している。はじめに、閾値を導入することで、信号の振幅情報が得られるとともに、 $\ell_1$ -ノルム最小化にもとづいた信号復元が凸最適化法によって効率的に実行できることを指摘している。次いで、この方法によって得られる信号復元性能をレプリカ法により評価し、閾値を適切な値に設定することで信号復元に関する性能指標である平均自乗誤差を最小化できること、ならびに、最適な閾値が正、負の標本値が得られる割合によって特徴づけられることを示している。さらに、これらの結果を受けて、正、負の標本値の割合が目標値に近づくように閾値を適応的に学習するアルゴリズムを提案し、提案法により、振幅情報の獲得も含めた高性能な信号復元が可能になることを数値実験によって確認している。

第 4 章「Bayesian inference」では、対象信号に関する事前分布が与えられている状況を想定した上で、ベイズ推論による信号復元について検討している。はじめに、平均自乗誤差を性能指標とした場合、最適な性能を達成する信号復元法がベイズ事後確率に関する信号ベクトルの期待値を復元結果とするベイズ推論の方法であることを示している。次いで、この方法によって得られる信号復元性能をレプリカ法により評価し、達成される性能が  $\ell_1$ -ノルム最小化による方法よりも大幅に優れていること、ならびに、非ゼロ成分が正規乱数として特徴づけられる場合には非ゼロ成分の位置が既知である場合と同等の性能が漸的に達成されることを明らかにしている。加えて、キャビティ法にもとづいて信号復元アルゴリズムを構成し、レプリカ法によって予言された結果に大自由度極限で漸近する信号復元性能が信号長の自乗に比例する程度の計算量で得られることを数値実験により確認している。

第 5 章「Conclusion」では、本論文で得られた成果をまとめるとともに、引き続き取り組むべき課題について述べている。

以上を要するに、本論文は 1 ビット圧縮センシングの信号復元問題に関し、統計力学の知見にもとづいて、さまざまな状況において達成される信号復元性能を精緻に評価し、また、それらの状況に対して効率的に実行できる復元アルゴリズムを開発したものであり、理学上貢献するところが大きい。よって、博士（理学）の学位として十分な価値のあるものと認められる。

注意：「論文審査の要旨及び審査員」は、東工大リサーチポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。