

様式VI

博士学位論文調査報告書

論文題目 Studies on Discrete-Valued Vector Reconstruction from Underdetermined Linear Measurements
(劣決定線形観測に基づく離散値ベクトル再構成に関する研究)

申請者氏名 早川 諒

最終学歴 平成 29年 3月
京都大学大学院 情報学研究科 システム科学専攻修士課程 修了
令和 2年 3月
京都大学大学院情報学研究科 システム科学専攻博士後期課程
研究指導認定見込

学識確認 令和 年 月 日 (論文博士のみ)

論文調査委員 京都大学大学院情報学研究科
(調査委員長) 教授 下平 英寿

論文調査委員 京都大学大学院情報学研究科
教授 田中 利幸

論文調査委員 京都大学大学院情報学研究科
教授 山下 信雄

論文調査委員 大阪市立大学 大学院工学研究科
教授 林 和則

京都大学	博士 (情報学)	氏名	早川 諒
論文題目	Studies on Discrete-Valued Vector Reconstruction from Underdetermined Linear Measurements (劣決定線形観測に基づく離散値ベクトル再構成に関する研究)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>各成分が離散値をとる未知のベクトルをその線形観測から再構成する問題は、無線通信システムにおいてよく現れる基本的な問題である。線形観測の次元が未知ベクトルの次元以上である場合は、低演算量な線形のMMSE (Minimum Mean-Square-Error) 法によって良好な特性が得られることもあるが、線形観測の次元が未知ベクトルの次元よりも小さい劣決定系の場合には、これらの手法の特性は大きく劣化する。一方で、網羅的な探索に基づく最尤推定や最大事後確率推定は線形の手法よりも良い特性を達成可能であるが、未知ベクトルの次元が大きくなると計算量が膨大になるため実行が困難となる。したがって、大規模で劣決定な離散値ベクトル再構成の問題に対しては、できるだけ少ない計算量で良好な特性を達成するアルゴリズムが必要となる。本学位論文は、未知ベクトルの離散性を活用する低演算量な離散値ベクトル再構成アルゴリズムの提案と、離散値ベクトル再構成に関する理論解析を行うものである。第二章から第四章では数理最適化に基づくアルゴリズムの提案がされており、第五章と第六章では主に離散値ベクトル再構成に関する理論的な解析が行われている。</p> <p>本学位論文の第一章は序論となっており、研究目的や問題設定が述べられている。離散値ベクトル再構成やその無線通信における応用例が述べられるとともに、これまでに提案されている手法が概説されている。また、本学位論文の主要な成果の概要が説明されている。</p> <p>第二章では、離散値ベクトル再構成の最も簡単な例として二値ベクトル再構成が議論されている。まず、二値ベクトル再構成に対する従来のSOAV (Sum of Absolute Values) 最適化問題が重み付きSOAV最適化問題に拡張されている。重み付きSOAV最適化では、未知ベクトルの各成分に関する事前情報を目的関数のパラメータに反映することができる。さらに、重み付きSOAV最適化をそのパラメータを更新しながら繰り返し解くIW-SOAV (Iterative Weighted-SOAV) が提案されている。重み付きSOAV最適化問題は近接分離法とよばれるアルゴリズム群に含まれる最適化アルゴリズムによって解くことができ、本章ではDouglas-Rachfordアルゴリズムに基づく手法が導出されている。このアルゴリズムを用いた場合、未知ベクトルの次元の3乗オーダーの計算量で再構成を行うことが可能になる。計算機シミュレーションにより、MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 信号検出や非直交時空間ブロック符号の復号などの無線通信の問題において、提案手法が従来手法より良い特性を達成することが示されている。</p> <p>第三章では、複素数領域における凸最適化に基づく複素離散値ベクトル再構成アルゴリズムが提案されている。まず、従来の実数領域におけるSOAV最適化のアイデアを複素数領域の最適化に拡張したSCSR (Sum of Complex Sparse Regularizers) 最適化が提案され、さらにADMM (Alternating Direction Method of Multipliers) に基づく最適化アルゴリズムによってその解へ収束する系列を得られることが示されている。複素数領域で最適化を行うことにより、実数領域における手法では考慮できない実部と虚部の依存関係を活用することが可能となっている。SCSR最適化はさらに重み付きSCSR最適化に拡張され、第二章のIW-SOAVと同様のアイデアを用いた再構成アルゴリズムであるIW-SCSR (Iterative Weighted-SCSR) が提案されている。計算機シミュレーションにより、複素離散値ベクトル再構成の問題に対する提案手法の有効性が示されている。とくに、観測行列の各成分に相関がある場合において、提案手法は従来の手法と比べて小さい誤り率を達成可能である。</p>			

第四章では、非凸最適化に基づく再構成手法として、SOAV最適化の非凸最適化への拡張であるSSR (Sum of Sparse Regularizers) 最適化が提案されている。また、SSR最適化のためのアルゴリズムとして、ADMMに基づく手法と主・双対近接分離法に基づく手法が導出されている。ADMMに基づく手法は主・双対近接分離法に基づく手法と比べ速い収束性を示す一方で、主・双対近接分離法に基づく手法はADMMに基づく手法において行われる逆行列計算を必要としないというメリットがある。また、SSR最適化を複素数領域に拡張した最適化問題も提案されており、ADMMに基づく最適化アルゴリズムが導出されている。非凸な最適化問題であるため大域的最適解への収束性は保証されないものの、非凸最適化に基づく手法が従来の凸最適化に基づく手法よりも良い特性を達成可能であることが計算機シミュレーションによって示されている。

第五章では、SOAV最適化に関する理論解析について議論されている。最初に、未知変数の有界性に基づいて、SOAV最適化にBox制約とよばれる制約条件を加えたBox-SOAV最適化問題が提案されている。次に、CGMT (Convex Gaussian Min-max Theorem) と呼ばれる定理を用いて、観測行列に関するある仮定のもとでBox-SOAV最適化によって得られる推定値の漸近的な誤差が評価されている。さらに、得られる推定値の漸近的な分布も導出されており、この結果を用いることで最終的な硬判定の推定値を得る処理の最適化が可能となっている。また、得られた理論的な結果に基づいて、Box-SOAV最適化のパラメータの最適値を数値的に得る方法も提案されている。再構成問題の規模が十分に大きい場合、計算機シミュレーションによる再構成によって理論的な結果と近い特性を得られることが示されている。

第六章では、近似メッセージ伝播法とSOAV最適化のアイデアに基づく再構成アルゴリズムが提案されている。この手法もCGMTと同様に観測行列の構造に仮定を必要とするものの、少ない計算量で良好な特性を得ることができる。また、状態発展法と呼ばれるアプローチを用いて提案アルゴリズムの理論解析が行われており、再構成によって得られる推定値の誤差や、観測雑音がない場合に誤差なく再構成するのに必要な観測率が導出されている。さらに、観測雑音がない場合に提案アルゴリズムと対応するSOAV最適化のパラメータの導出法についても議論されている。理論解析結果によって得られる必要な観測率を境として、実際の再構成の成功率が急激に上昇することが計算機シミュレーションによって示されている。

第七章は、学位論文全体の結論となっている。これまでに得られた研究成果の概要がまとめられるとともに、今後の研究の展開に対する展望が述べられている。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

未知の離散値ベクトルを線形観測に基づいて再構成する問題は無線通信システムにおいてよく現れる基本的な問題である。線形観測の次元が未知ベクトルの次元以上である場合は線形的手法を用いて低演算量で良好な特性が得られる。ところが、線形観測の次元が未知ベクトルの次元よりも小さい劣決定系の場合は、網羅的な探索に基づく最尤推定や最大事後確率推定が良い特性を達成可能であるものの、計算量が膨大になる問題があった。本学位論文は、大規模で劣決定な離散値ベクトル再構成の問題に対して、未知ベクトルの離散性を活用する低演算量な離散値ベクトル再構成アルゴリズムの提案と、離散値ベクトル再構成に関する理論解析を行うものである。本研究で得られた主な成果は以下の通りである。

1. 離散値ベクトル再構成に対して、数理最適化に基づく新たなアルゴリズムを提案した。まず、従来法の二値ベクトル再構成に対する最適化問題を拡張し、未知ベクトルに関する事前情報を目的関数の重みとして利用する方法を提案した。また、その最適化と重みの更新を交互に反復する手法を提案し、従来手法と比べ小さな誤り率を達成することを計算機シミュレーションによって示した。次に、無線通信で用いる信号が複素数の離散値をとることを考慮し、複素数領域で再構成を行う手法も提案した。従来法の正則化項は凸関数を用いていたが、非凸関数を導入することでより小さな誤り率を達成することを計算機シミュレーションによって示した。

2. 離散値ベクトル再構成手法の誤り率に関して、CGMT (Convex Gaussian Min-max Theorem) と呼ばれる定理を用いた理論解析を行った。理論を適用するために観測行列に仮定を置いたうえで、ある種の制約を加えた再構成法 (Box-SOAV最適化) の漸近的な誤り率を導出し、さらに漸近的な誤り率を最小にする目的関数のパラメータを求める方法も提案した。問題の規模が十分に大きい場合、理論から予想される誤り率が現実を十分によく近似していることを示した。

3. 近似メッセージ伝播法のアイデアに基づいた離散値ベクトル再構成手法を提案し、その理論解析を行った。この手法はその導出において前項と同様に観測行列の構造に仮定を必要とするものの、その仮定が満たされる状況においては少ない計算量で良好な特性を達成する。再構成によって得られる推定値の漸近的な誤差や、観測雑音がない場合に誤差なく再構成するのに必要な観測率を導出した。理論から予想される必要な観測率を境として、実際の再構成の成功率が急激に上昇することをシミュレーションによって示した。

以上のように、本学位論文は、離散値ベクトル再構成の問題に対して、従来の研究のアイデアを発展させた新たな再構成手法を提案している点、および、再構成手法の漸近的な特性を複数の観点から理論的に解明している点において重要であり、統計的信号処理分野の発展に資するものである。また、本論文は論理的に明確に記述されており、申請者は関連事項について高い学識を有するものと判断される。よって、本論文は博士 (情報学) の学位論文として価値あるものと認める。また、令和2年2月18日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

要旨公開可能日： 未定