

令和元年6月10日現在

機関番号：34315

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2017～2018

課題番号：17H07243

研究課題名（和文）超解像位相アンラップ法の高精度化および高速化に関する研究

研究課題名（英文）A Study on Accuracy Improvement and Acceleration for Super-Resolution Phase Unwrapping

研究代表者

北原 大地 (Kitahara, Daichi)

立命館大学・情報理工学部・助教

研究者番号：20802094

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：複素平面における単位円周上の位相アンラップ問題に対して、代数的位相アンラップの適用条件の緩和と数値的不安定性の解消のため、連続位相計算に必要な多項式剰余列を生成する多項式除算型演算を新たに構築した。この計算が新たに開発した自己反転型部分終結式と呼ばれる行列式を用いて表現できることも示した。

APSIPA 2018において東工大の山田功教授とともに位相に関する非凸最適化問題に対して、ブランチカット型の新解法を発表した。また、ICASSP 2019においてUniv. Grenoble AlpesのLaurent Condat准教授とともに、2次元位相アンラップ問題に関する新たな凸緩和法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自己反転型多項式除算によって剰余体などの代数系を定義できれば、符号理論や多項式代数の分野で新たな理論が展開できる可能性がある。また、工学的にも、2次元位相アンラップ法の高精度化やブランチカット型符号推定法の開発により、「合成開口レーダ・ソナーによる地形・海底観測」、「光学式干渉計による精密な3次元形状計測」、「MRIや位相コントラストX線CTによる医療診断」など様々なセンシング技術の精度向上が期待できる。

研究成果の概要（英文）：For the phase unwrapping problem along the unit circle of the complex plane, we newly developed the self-reciprocal polynomial division which generates a new Sturm sequence. This Sturm sequence enables us to compute the unwrapped phase stably. Moreover, we newly defined the self-reciprocal subresultant, as the determinant of a certain matrix, and developed the relation between the signs in the Sturm sequence and those of the self-reciprocal subresultants. Then, by replacing the inductive computations of the Sturm sequence with direct numerical evaluations of the self-reciprocal subresultants, we can compute the unwrapped phase without suffering from the coefficient growth.

In APSIPA 2018, for the 180-degree ambiguity resolution of a two-dimensional vector field, we proposed a branch cut type solver which is inspired by Goldstein's approach for 2D phase unwrapping. In ICASSP 2019, for 2D phase unwrapping problem, we showed the effectiveness of a new convex relaxation formulation.

研究分野：工学

キーワード：位相アンラップ 多項式剰余 部分終結式 スプライン関数 超解像 ブランチカット 凸・非凸最適化

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

非零複素数の位相には「 2π の整数倍の任意性」が存在するが(図1)、リモートセンシングや医用画像処理の分野では、 2 次元平面上の各点

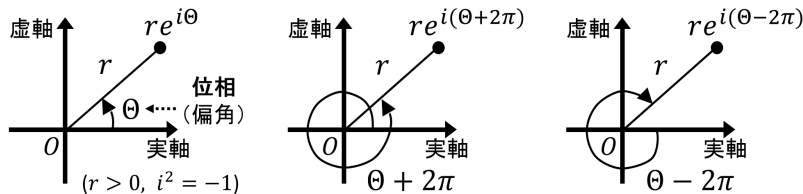


図1. 非零複素数の位相における $2\pi n$ (n は整数)の任意性.

に位相値が対応付けられた連続関数(位相曲面)が利用されるため、「 2π の整数倍の任意性」を解消しなければならない。「 2 次元平面上の複素数値データ」から「最小の変動量を持つ位相曲面」を決定する問題(2次元位相アンラップ問題という)は、単純な定式化によって解決に迫ろうとすると、整数の組を探索するNP困難な逆問題になることが知られていた。そのため、1970年代以来、カリフォルニア工科大やスタンフォード大のグループが中心となり多種多様な手法を提案してきたが、何れもヒューリスティックな近似解法であり、雑音によりアンラップ結果が大きく変動してしまう致命的な欠陥を抱えていた。

研究代表者は、ポアンカレの補題を応用することで、「位相曲面の推定問題」が「ベクトル場の推定問題」に帰着できることを示しており、「関数データ解析」の観点で設計したベクトル場(区分的多項式として表現可能)に対して、「代数的位相アンラップ」を適用することで、位相曲面を連続関数として復元する「超解像位相アンラップ法」を提案していた。提案法は、ベクトル場設計の際、大きな雑音を除去するため、雑音にロバストな推定が実現可能となる。しかしながら、小さな雑音は依然として除去しきれず、計算時間も非常に長いという問題があった。

2. 研究の目的

位相アンラップは「複素信号の観測データ」から「滑らかな真の連続位相」を推定する問題である。 3 次元計測や医用画像診断の分野では、位相アンラップの成否により計測結果や診断結果が大きく異なってしまうため、様々な雑音に対しロバストでかつ高精度な位相アンラップ法の開発が望まれている。一方で、研究代表者は「関数データ解析(観測データを連続関数としてモデル化する統計解析)」と「代数的位相アンラップ(複素多項式に対する連続位相計算法)」を融合させた、雑音にロバストな「超解像位相アンラップ法」を平成28年度に提案している。本研究では、合成開口レーダ・光学式干渉計・MRIなどのセンシング技術の飛躍的な性能向上のために、超解像位相アンラップ法の高精度化および高速化を目的とする。より具体的には、(a)複素信号の先験情報を考慮した高精度な超解像位相アンラップ法の開発と、(b)大規模観測データを高速に処理する並列計算手法の確立を目的とする。

3. 研究の方法

本研究の目的は、複素信号の先験情報を考慮した高精度な超解像位相アンラップ法の開発、および大規模観測データを高速に処理する並列計算手法の確立である。研究の進め方として、(a)平成29年度では、位相アンラップの応用対象である「合成開口レーダ・ソナー、光学式干渉計、MRI・位相コントラストX線CT」の複素信号が固有に持つ性質を明らかにし、それらの性質を的確に表現する最適化基準を「凸最適化の枠組み」で構築する。数値実験においては真の位相曲面が既知の小規模データを利用し、どの最適化基準が優れているかを検証していく。(b)平成30年度では、真の位相曲面が未知の大規模な実データに対して、前年度に構築した最適化基準に基づき超解像位相アンラップ法を適用し、その有効性を検証する。有効性を確認した後、短時間で同等の復元結果を得るために、超解像位相アンラップ法の「厳密計算時の速度向上」と「並列処理による高速な近似計算手法の開発」に取り組む。

4. 研究成果

平成29年度は、位相アンラップの応用先として挙げられるMRI信号およびCT信号に関する研究を行うことができた。MRI分野では、撮像時間を短縮する圧縮センシングMRIという技術に対して、従来の凸最適化問題に現れる「観測データとの整合性項」と「辞書と呼ばれる基底(またはフレーム)との整合性項」の2つをレベル集合制約とした問題を提案した。数値実験により、提案法が、同一のパラメータ設定でも異なる対象画像をロバストに再構成できることを示した。また、提案する凸最適化問題の解法として、交互方向乗数法(ADMM)を用いることで、再構成時間の短縮にも成功した。

CT分野では、X線被曝量を低減するために、低線量投影データから良好な画像を再構成する手法を提案した。提案法では、辞書学習を利用する従来法における、辞書と正則化パラメータをマルチクラスへと拡張することで、アーチファクトが大幅に抑制された良好な再構成結果を生成することに成功した。

複素平面における単位円周上の位相アンラップ問題に対しては、「代数的位相アンラップの適用条件の緩和と数値的不安定性の解消」のため、連続位相計算に必要なスツルム列と呼ばれる

多項式剰余列を生成する「多項式除算型演算」を新たに構築した。さらにスツルム列に現れる関数が新たに開発した「自己反転型部分終結式」と呼ぶ行列式を用いて表現できることを示し、数値的不安定性の原因となっていた「再帰的多項式除算」の回避に成功した。この構造は、実軸上の代数的位相アンラップに対して、ユークリッドの互除法と通常の部分終結式を用いることで数値的不安定性を解消したときと全く同じになる。したがって、この研究成果は、今までは明らかでなかった単位円周上の多項式に関する代数的構造を解明する足掛かりになると考えられ、今後のさらなる理論的展開が期待される。この研究成果は、サンプリング理論に関するトップレベルの国際会議「International Conference on Sampling Theory and Applications」にも採択された。

平成 30 年度では、まず、「Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference 2018」において、東京工業大学の山田功教授とともに位相に関する Special Session を開催し、国内外の位相信号処理の研究者と深い議論を行った。この Special Session において、位相に関する非凸最適化問題に対して、ブランチカット型の新解法を発表し注目を集めた。また、Univ. Grenoble Alpes の Laurent Condat 准教授を招聘研究員として招き、2 次元位相アンラップ問題に登場する非凸最適化問題に対して、新たな凸緩和手法を開発した。この共同研究成果は、「2019 International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing」にて発表された。

レーダ信号処理では、研究範囲を従来の合成開口レーダからフェーズドアレイ気象レーダに拡大させ、非線形ビームフォーミングやデータ圧縮に関する研究発表を行った。MR 画像再構成問題では、従来あまり着目されていなかった MR 複素信号の位相部分に着目することで、より高性能な再構成アルゴリズムを確立することができた。この際、ある行列が BCCB 構造を持つことを初めて明らかにし、これを用いて計算が非常に高速化されることも示した。また、スプライン平滑化に関しても、エッジを表現可能なエッジ保存スプライン平滑化を新たに開発し、今後の更なる進展が期待できる。その他、単一画像からの GAN による超解像に関する研究発表も行っている。ニューラルネットワークの出力層と損失関数を変更することで、従来手法の性能を凌駕することに成功している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

平林 晃, 北原 大地, "圧縮センシングの基礎と画像取得への応用," 光学, vol. 46, no. 10, pp. 393-397, 2017.
<http://myosj.or.jp/kogaku/backnumber/46-10/>

〔学会発表〕(計 19 件)

L. Condat, D. Kitahara, and A. Hirabayashi, "A convex lifting approach to image phase unwrapping," 2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2019.

山本 宏哉, 北原 大地, 平林 晃, "客観品質を考慮した敵対的生成ネットワークによる画像超解像," 電子情報通信学会信号処理研究会, 2019.

中本 和磨, 藤井 皓介, 北原 大地, 平林 晃, "2 種類の辞書と BCCB 行列の対角化を利用した MR 画像再構成," 電子情報通信学会信号処理研究会, 2019.

D. Kitahara and I. Yamada, "A branch cut algorithm for 180-degree ambiguity resolution in 2D vector fields and its application to single-frame fringe projection profilometry," 2018 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC), 2018.

D. Kitahara, M. Nakahara, A. Hirabayashi, E. Yoshikawa, H. Kikuchi, and T. Ushio, "Nonlinear beamforming via convex optimization for phased array weather radar," 2018 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC), 2018.

D. Kitahara, A. Hirabayashi, E. Yoshikawa, H. Kikuchi, and T. Ushio, "Nonlinear beamforming based on group sparsity for phased array weather radar," 第 33 回 SIP シンポジウム, 2018.

D. Kitahara, L. Condat, and A. Hirabayashi, "1D piecewise smooth function estimation with spline functions," 第 33 回 SIP シンポジウム, 2018.

藤井 皓介, 中田 和希, 北原 大地, 平林 晃, "2 種類の直交辞書を用いた MR 画像高精度再構成," 第 33 回 SIP シンポジウム, 2018.

川見 亮介, 北原 大地, 平林 晃, 吉川 栄一, 菊池 博史, 牛尾 知雄, "フェーズドアレイ気象レーダのデータ圧縮と 3 階テンソル辞書学習を用いた高精度再構成," 第 33 回 SIP シンポジウム, 2018.

冷 可, 姚 賽, 荒木 はなこ, 北原 大地, 平林 晃, 伊波 早苗, 手塚 祐司, 巖西 真規, 柏木 厚典, "湖南地域における 2 型糖尿病患者の特性の解明 肥満と 2 型糖尿病管理につ

いて,"第55回日本糖尿病学会近畿地方会,2018.
北原 大地,杉浦 紫緒里,平林 晃,"量子化された符号化撮像からの高精度ライトフィールド再構成,"第24回画像センシングシンポジウム,2018.
鴨下 飛竜,北原 大地,平林 晃,"マルチクラス辞書学習を用いた低線量CT画像再構成,"電子情報通信学会信号処理研究会,2018.
北原 大地,小田 亮太,平林 晃,"混合過程推定にスパース性を利用したブラインド音源分離,"第62回システム制御情報学会研究発表講演会,2018.
小田 亮太,北原 大地,平林 晃,"インパルス応答のスパース性を利用したブラインド音源分離,"電子情報通信学会信号処理研究会,2018.
馬場 敦之,片岡 秀公,北原 大地,平林 晃,"直交射影層を用いた畳み込みニューラルネットワークによる画像超解像,"電子情報通信学会信号処理研究会,2018.
R. Kawami, H. Kataoka, D. Kitahara, A. Hirabayashi, T. Ijiri, S. Shimamura, H. Kikuchi, and T. Ushio, "Fast high-quality three-dimensional reconstruction from compressive observation of phased array weather radar," 2017 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC), 2017.
柴田 基,北原 大地,平林 晃,"レベル集合制約を用いた圧縮センシングMRI,"第8回横幹連合コンファレンス,2017.
柴田 基,北原 大地,平林 晃,"圧縮サンプリングからのパラメータ設定に頑健なMR画像再構成法,"第32回信号処理シンポジウム,2017.
D. Kitahara and I. Yamada, "Algebraic phase unwrapping with self-reciprocal polynomial algebra," 2017 International Conference on Sampling Theory and Applications (SampTA), 2017.

〔その他〕

ホームページ等

立命館大学 研究者学術情報データベース

<http://research-db.ritsumei.ac.jp/Profiles/134/0013393/profile.html>

立命館大学 メディアセンシング研究室 論文リスト

<http://www.ms.is.ritsumei.ac.jp/publication.html>

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：なし

(2)研究協力者

研究協力者氏名：平林 晃,山田 功,Laurent Condat,吉川 栄一,菊池 博史,牛尾 知雄,手塚 祐司,伊波 早苗,柏木 厚典

ローマ字氏名：Akira Hirabayashi, Isao Yamada, Laurent Condat, Eiichi Yoshikawa, Hiroshi Kikuchi, Tomoo Ushio, Yuji Tezuka, Sanae Iha, Atsunori Kashiwagi

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、研究者個人に帰属されます。