

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	代数的位相アンラップとスプライン平滑化による信号処理に関する研究
Title(English)	A Study of Algebraic Phase Unwrapping and Spline Smoothing for Signal Processing Applications
著者(和文)	北原大地
Author(English)	Daichi Kitahara
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第10479号, 授与年月日:2017年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:山田 功,植松 友彦,中山 実,府川 和彦,尾形 わかは,平林 晃
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第10479号, Conferred date:2017/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

論文要旨

THESIS SUMMARY

専攻： Department of	通信情報工学	専攻：	申請学位（専攻分野）： 博士 Academic Degree Requested Doctor of
学生氏名： Student's Name	北原 大地	指導教員（主）： Academic Advisor(main)	山田 功
		指導教員（副）： Academic Advisor(sub)	

要旨（和文 2000 字程度）

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

本論文は“A Study of Algebraic Phase Unwrapping and Spline Smoothing for Signal Processing Applications (代数的位相アンラップとスプライン平滑化による信号処理に関する研究)”と題し、英文 8 章よりなっている。

第 1 章 “Introduction (序論)” では、まず、リモートセンシングや医用画像処理等に現れる「位相アンラップ」を代表例として、「信号処理における連続関数推定問題」の役割と困難さについて説明した後、本研究が注目する「代数的位相アンラップ」と「スプライン平滑化」を紹介している。次に、これらの飛躍的な応用拡大を実現するには、代数的位相アンラップの適用範囲の拡張と数値的不安定性の解消と共に、多様な制約条件に対応可能な新しいスプライン平滑化の開発が不可欠であることを述べ、本研究の目的を明らかにしている。

第 2 章 “Preliminaries (準備)” では、代数的位相アンラップとスプライン平滑化の基礎的な性質を纏めている。

第 3 章 “Refinements and Stabilizations of Algebraic Phase Unwrapping (代数的位相アンラップの改良と安定化)” では、代数的位相アンラップに現れる「スツルム列生成アルゴリズム」を修正することにより、代数的位相アンラップの適用条件を緩和する方法を提案すると共に、代数的位相アンラップの計算機実装で問題となっていた数値的不安定性の解消法を提案している。まず、従来のスツルム列生成アルゴリズムに現れていた場合分けを無くす工夫によって、スツルム列に現れる関数の符号が部分終結式とよばれる行列式を用いて表現できることを明らかにしている。次に、部分終結式を用いた符号計算により、数値的不安定性の原因となっていた「再帰的な多項式除算」を回避する方法を実現している。さらに、数値実験の結果から、提案法によって代数的位相アンラップの数値的不安定性が解消されることを確認している。

第 4 章 “One-Dimensional and Two-Dimensional Nonnegative Spline Smoothing (1 次元および 2 次元非負値スプライン平滑化)” では、滑らかな非負値関数の推定問題への応用を念頭におき、1 次元および 2 次元の「非負値スプライン平滑化」を提案している。まず、スプライン関数の非負値性を大域的に保証するために、係数ベクトルに関する 6 つの十分条件を線形不等式の形式で与えている。次に、これらの十分条件を利用することにより、「非負値スプライン平滑化問題」および「非負値スプライン補間問題」が、いずれも係数ベクトルに関する 2 次計画問題に帰着されることを明らかにしている。さらに、数値実験によって、提案法の有効性を確認している。

第 5 章 “Algebraic Phase Unwrapping Based on Two-Dimensional Spline Smoothing (2 次元スプライン平滑化を利用した代数的位相アンラップ)” では、代数的位相アンラップとスプライン平滑化を融合した「2 次元位相アンラップ法」を提案している。まず、「2 次元連続位相の推定問題」が「2 次元ベクトル場の推定問題」に帰着できることを明らかにしている。次に、2 次元スプライン関数空間で凸最適化を行ない、2 次元ベクトル場を表現する最適な区分的多項式を導出している。さらに「2 次元ベクトル場の区分的多項式表現」に代数的位相アンラップを適用し、2 次元連続位相の推定値を算出する方法を提案している。合成開口レーダを用いた標高推定問題に対する数値実験によって、提案法が従来法に比べて高い推定精度を達成することを確認している。

第 6 章 “A Branch Cut Type Sign Estimator for Single-Frame Fringe Projection (単一フレームを用いた縞投影法のためのブランチカット型符号推定法)” では、2 次元格子上で観測された主値位相の絶対値から、主値位相の符号を推定するアルゴリズムを提案している。まず、観測画像の勾配情報と主値位相の符号を用いて、連続位相の変動エネルギーを定義し、「主値位相の符号推定問題」が「変動エネルギー最小化問題」に帰着できることを示している。次に、「変動エネルギー最小化問題」と「2 次元位相アンラップの組み合わせ論的定式化」の関係を明らかにすると共に、位相アンラップの古典的解法に着想を得た「ブランチカット型アルゴリズム」を実現し、これを「主値位相の符号推定問題」に応用している。数値実験によって、提案法の優れた符号推定性能を確認している。

第 7 章 “Probability Density Estimation with Nonnegative Spline Functions (非負値スプライン関数を用いた確率密度推定)” では、確率変数の有限個の標本値から生成されたヒストグラムを用いて、滑らかな確率密度関数を非負値スプライン関数によって推定する方法を提案している。具体的には、第 4 章で提案した「非負値スプライン平滑化」を改良することにより、スプライン関数の全区間における積分値の正規性を制約条件とし、スプライン関数とヒストグラムの誤差のエネルギーとスプライン関数の滑らかさ基準(2 階微分のエネルギー)の荷重和を最小化する非負値スプライン関数を確率密度関数の推定値とする方法を提案している。数値実験により、「カーネル密度推定法」と比べて、提案法が優れた推定精度を示すことを確認している。

第 8 章 “Conclusion (結論)” では、本論文で得られた成果を総括している。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(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。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

論文要旨

THESIS SUMMARY

専攻：通信情報工学 専攻
Department of
学生氏名：北原 大地
Student's Name

申請学位(専攻分野)：博士 (工学)
Academic Degree Requested Doctor of
指導教員(主)：山田 功
Academic Advisor(main)
指導教員(副)：
Academic Advisor(sub)

要旨(英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words)

In this thesis, we enhance the algebraic phase unwrapping and the spline smoothing for their broader applications. In Chapter 2, as preliminaries, we introduce the fundamental knowledge on the algebraic phase unwrapping and the spline smoothing. In Chapter 3, we refine the algebraic phase unwrapping by removing the conditional branches in the original polynomial division type algorithms which generate certain Sturm sequences. Since the signs in the redefined Sturm sequences can be computed with the use of special determinants called subresultants, the unwrapped phase of a complex polynomial can be computed without suffering from numerical instabilities caused by the inductive polynomial division steps. In Chapter 4, in order to construct nonnegative and smooth continuous functions, we propose algorithms for the nonnegative spline smoothing. To guarantee the nonnegativity of spline functions over their continuous domains, we newly derive some sufficient conditions in the form of linear inequalities on the coefficients of the spline functions. As a result, the proposed nonnegative spline smoothing can be realized by solving certain convex quadratic programming problems. In Chapter 5, we propose a novel 2D phase unwrapping scheme based on the algebraic phase unwrapping and the spline smoothing. For given wrapped phase samples, the proposed scheme first constructs a pair of bivariate spline functions, as a vector field, by using the spline smoothing. Then, the proposed scheme estimates the desired 2D unwrapped phase by applying the algebraic phase unwrapping to the vector field. The proposed estimate satisfies the desired consistency with all wrapped phase samples. In Chapter 6, inspired by Goldstein's combinatorial approach to 2D phase unwrapping, we propose the single-frame fringe projection profilometry, where we estimate the signs of wrapped phase samples on 2D lattice points by a branch cut type algorithm. In Chapter 7, by modifying the idea of the nonnegative spline smoothing in Chapter 4, we estimate smooth probability density functions as nonnegative spline functions which minimize the weighted sum of the energy of local change of the spline function and the square error between the spline function and a histogram based on finite observed samples.

Finally, in Chapter 8, we summarize the results obtained in this thesis.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1 copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(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。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).