

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	全体凸性条件を満たすDC型非凸正則化モデルに関する研究
Title(English)	A Study on Difference-of-Convex Type Nonconvexly Regularized Convex Models
著者(和文)	ZHANG Yi
Author(English)	Yi Zhang
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12810号, 授与年月日:2024年6月30日, 学位の種別:課程博士, 審査員:山田 功,植松 友彦,府川 和彦,尾形 わかは,山下 真
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12810号, Conferred date:2024/6/30, 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

(博士課程)
Doctoral Program

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	情報通信 情報通信	系 コース	申請学位 (専攻分野)： Academic Degree Requested	博士 Doctor of	(工学院)
学生氏名： Student's Name	ZHANG YI		審査員主査： Chief Examiner	山田 功	

要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

本論文は“A Study on Difference-of-Convex Type Nonconvexly Regularized Convex Models (全体凸性条件を満たす DC 型非凸正則化モデルに関する研究)”と題し、英文 7 章よりなっている。

第 1 章“Introduction (序論)”では、近年の信号処理・機械学習分野では、推定問題の多くがスパースモデリングの応用によって解決されてきたことを述べると共に、スパースモデリングの代表例として、旧来の凸型および非凸型正則化モデルに加え、両者の進化形である DC (Difference-of-Convex) 型非凸正則化モデルを概説している。まず、凸型正則化モデルは、大域的最適化が可能である長所を持つが、大振幅成分の過小推定を招く短所があること、非凸型正則化モデルは、大振幅成分の過小推定を抑える長所を持つが、大域的最適化が著しく困難になる短所があることを指摘している。次に 2017 年以降、両モデルの長所を兼備した DC 型非凸正則化モデルが登場し、注目されていることを述べ、本論文の目的を明らかにしている。

第 2 章“Preliminaries (準備)”では、本論文で用いる DC 最適化や凸解析等に関する数学的準備を行っている。

第 3 章“A Unified Framework for Solving a General Class of DC Type Nonconvexly Regularized Convex Models (DC 型非凸正則化モデルの一般形と解法のための統一的枠組み)”では、DC 型非凸正則化モデルの一般形を与えると共に、その大域的最適解を求める解法戦略を提案している。まず、任意の DC 関数を任意の精度で近似できる pSDC (partially smoothed DC) 関数を与え、凸関数をデータ忠実項に採用し、複数の pSDC 関数の和を正則化項とする DC 型非凸正則化モデルの一般形を提案している。次に、全体凸性を担保する条件を導くと共に、全体凸性条件の下で、新しい DC 最適化アルゴリズムを構築し、その大域的収束性を示している。さらに、数値実験により、提案モデルと提案アルゴリズムの有効性を明らかにしている。

第 4 章“An Inexact DC Algorithm with Provably Terminating Inner Loop (インナーループの有限停止保証を持つ近似 DC アルゴリズム)”では、第 3 章で提案した DC 最適化アルゴリズム内で定義された副問題の厳密解を近似するために組み込まれたインナーループに着目し、指定された近似誤差基準を有限回の反復で達成可能な近似 DC アルゴリズムを提案している。提案アルゴリズムは、インナーループの有限停止性を保証する世界初の近似 DC アルゴリズムであり、副問題の厳密解の利用を前提とした従来型の DC algorithm と同等な収束性能を持っている。

第 5 章“Solution-Set Geometry and Regularization Path of sGMC Model (sGMC モデルの解集合の幾何学的性質および正則化経路解析)”では、凸型スパース正則化モデルの標準形 (LASSO モデル) の一般形である scaled generalized minimax concave (sGMC) モデルを DC 型非凸正則化モデルの代表例として取り上げ、その解集合の幾何学的性質と正則化経路解析を行っている。まず、sGMC モデルが、LASSO モデルの優れた幾何学的性質を継承しながら、大振幅成分の過小推定を抑える特長を備えていることを明らかにしている。次に、sGMC モデルの正則化経路が正則化パラメータの区分的線形関数になることを証明し、sGMC モデルの正則化経路を有限回の計算で算出可能とするアルゴリズムを提案している。提案法は、固定された正則化パラメータに対して知られていた sGMC モデルの逐次近似アルゴリズムに比べ、遥かに効率的に sGMC モデルの正則化経路を算出可能であり、また、数値実験により、ベイズ情報量基準 (BIC) との併用で、最適な正則化パラメータの決定が効率的に実現できることを確認し、提案アルゴリズムの有効性を実証している。

第 6 章“Less Biased Sparse Adaptive Filtering Based on DC Optimization (DC 最適化に基づく低バイアスなスパース適応フィルタリング)”では、DC 型非凸正則化モデルに基づいたスパース適応フィルタリングのアルゴリズムを提案している。まず、時変のデータ忠実項に DC 型のスパース正則化項を加えた時変損失関数を定義している。提案アルゴリズムは、非凸型 FBS (Forward-Backward Splitting) 法のアイディアを利用してこの時変損失関数の抑圧を実現している。数値実験により、従来のスパース適応フィルタリングに比べ、提案法が優れた推定性能を達成することを確認している。

第 7 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

系・コース： Department of, Graduate major in	情報通信 情報通信	系 コース	申請学位 (専攻分野)： 博士 Academic Degree Requested Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	ZHANG YI		審査員主査： Chief Examiner	山田 功

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words)

In this thesis, we focus on an emerging trend in signal processing, i.e., constructing well-behaved nonconvex regularizers which can preserve convexity of the cost function. Our contribution covers the design, optimization methods and statistical analysis regarding such convexity-preserving (CP) regularizers.

In Chapter 2, as preliminaries, we introduce necessary knowledge about difference-of-convex (DC) optimization, variational analysis and sparse regularization models.

In Chapter 3, we propose a general class of CP regularizers which embraces and extends existing studies. Exploiting the difference-of-convex (DC) structure of the proposed CP regularizer, we develop a unified framework for solving the resultant DC type nonconvexly regularized convex (NRC) models.

In Chapter 4, we point out that when applying existing DC algorithms to real world problems, the inner loop of DC algorithm may not terminate within finite iterations, and we propose a novel inexact DC algorithm to resolve this difficulty.

In Chapter 5, we take the scaled generalized minimax concave (sGMC) model for sparse linear regression as a representative of DC type NRC models, and we study its solution-set geometry and regularization path. Our study indicates that while the sGMC penalty is a nonconvex extension of the conventional LASSO (Tibshirani 1996) penalty, the sGMC model preserves many favorable properties of the LASSO model, hence can serve as a less biased surrogate of the LASSO model. Notably, we prove that similar to LASSO, the minimum l_2 -norm solution path of the sGMC model is piecewise linear in the regularization parameter. Based on this finding, we propose an efficient iterative algorithm for computing the entire minimum l_2 -norm regularization path of the sGMC model, which proves useful in finding the optimal regularization parameter.

In Chapter 6, we extend the results developed in previous chapters to sparse adaptive filtering problems. We propose a novel DC type sparse regularizer which embraces the well-known MC penalty and SCAD penalty as special instances. Exploiting its DC structure, a less biased sparse adaptive filtering algorithm is derived. Numerical experiments demonstrate the efficiency of the proposed algorithm.

Chapter 7 concludes 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 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).