

令和 5 年 5 月 26 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K20361

研究課題名（和文）エッジ保存スプライン平滑化による不連続箇所を含む関数の推定とその応用に関する研究

研究課題名（英文）A Study on Estimation of Functions with Discontinuous Points by Edge-Preserving Spline Smoothing and Its Applications

研究代表者

北原 大地 (Kitahara, Daichi)

大阪大学・大学院工学研究科・特任研究員（常勤）

研究者番号：20802094

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：スプライン関数は滑らかな区分的多項式であり、その柔軟性と滑らかさに関する最適性から、データの補間や平滑化といった連続関数の推定問題に広く利用されている。一方で、エッジを含む不連続な関数の推定には向かないと、従来考えられていた。本研究では、各データ点間で不連続性を適応的に許容するスプライン関数を新たに設計し、これを用いて、エッジ検出とエッジ以外の領域における平滑化を同時に行う、エッジ保存スプライン平滑化を開発した。エッジ保存スプライン平滑化は凸最適化問題として定式化され、実際に従来のスプライン平滑化や離散標本値のみを推定するアプローチと比べて、より優れた推定精度を達成できることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

有限個の離散標本値のみを推定するアプローチと比べて、関数全体を推定するアプローチの利点は、関数を一度推定してしまえば、任意の点における標本値が瞬時に計算可能になることである。本研究の成果は、エッジを含む不連続な関数の推定に対しても、スプライン関数を有効に活用できることを明らかにしたものである。今後計算アルゴリズムを更に高速化できれば、従来のスプライン関数で連続関数を高速・高精度に推定するのと同様に、本研究のスプライン関数でエッジを含む関数を高速・高精度に推定できるようになり、複雑なエッジを含むデータからも任意の点の高精度標本値を与える、様々な応用で利用可能な超解像アルゴリズムの実現に繋がる。

研究成果の概要（英文）：Spline functions are smooth piecewise polynomials, and because of their flexibility and optimality on smoothness, they are widely used for estimation problems of continuous functions such as interpolation and smoothing of data. On the other hand, it has been considered that spline functions are not suitable for estimation of discontinuous functions including edges. In this study, we designed novel spline functions that adaptively allow discontinuities between data points. By using them, we developed the edge-preserving spline smoothing that simultaneously performs edge detection and smoothing in non-edge regions. The edge-preserving spline smoothing is formulated as a convex optimization problem, and we found that it can achieve better estimation accuracy than the standard spline smoothing and conventional approaches that only estimate function values at the data points.

研究分野：信号処理、画像処理、レーダ信号処理、最適化、データサイエンス

キーワード：スプライン平滑化 スプライン関数 エッジ検出 超解像 凸最適化 ブロックスパース信号復元 分位点回帰 最頻区間回帰

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、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

スプライン関数は「区分的に多項式として定義される関数(図1)」であり、様々な連続関数を高精度に近似する柔軟性と、関数の滑らかさという観点での最適性から、離散データの補間や平滑化に幅広く利用されていた。一方、特に画像処理やレーダ信号処理の分野においては、有限個の不連続箇所(エッジともいう)を持つ関数の推定がしばしば必要とされるが、「大域的な連続性を仮定する従来のスプライン関数」によって推定を行うと、エッジ周辺の構造を大きく歪めてしまうという問題が生じていた。全てのエッジがあらかじめ検出されていれば、不連続箇所を事前に設定した上でスプライン平滑化を行う方法も考えられたが、最終的な推定結果が最初のエッジ検出ステップの精度に大きく依存してしまう。様々な形状のエッジを含む関数を高精度かつ安定的に推定するために、「エッジ検出」と「エッジ以外の領域における平滑化」を同時に実現する新しいスプライン平滑化の開発が望まれていた。

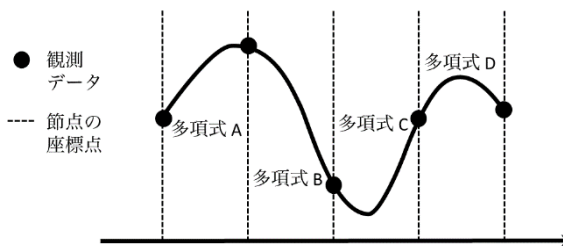


図1: スプライン関数の概略図

### 2. 研究の目的

有限個のエッジを含む区分的に滑らかな関数を推定するために、「各データ点間で不連続性を適応的に許容するスプライン関数(図2)」を開発する。有限個の離散標本値のみを推定するアプローチと比べて、区分的に滑らかな関数全体を推定するアプローチの利点は、関数を一度推定してしまえば、任意の点における標本値が瞬時に計算可能になることである。従来のスプライン関数で連続関数を高速・高精度に推定すると同様に、本研究のスプライン関数で区分的に滑らかな関数を高速・高精度に推定し、複雑なエッジを含む観測データからも、任意の点における標本値を計算できる超解像アルゴリズムを実現する。更に、理学から工学の幅広い分野で、本研究のエッジ保存スプライン平滑化の応用可能性を示す。

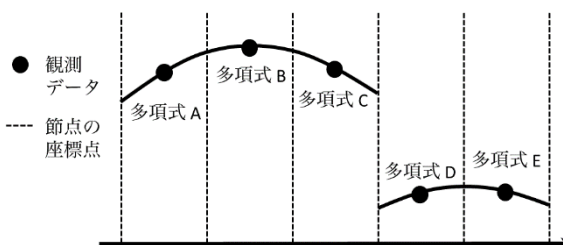


図2: 本研究のスプライン関数の概略図

### 3. 研究の方法

凸最適化問題とは、凸集合として表現される制約条件の中で、凸関数の値を最小にする点(=変数やベクトル)を探索する問題であり(図3)、柔軟な定式化を許容しつつ大域的な最適性を比較的容易に保証できるという利点を有している。「観測データとの整合性」及び「所望の信号に関する性質」を凸集合・凸関数として適切に表現できた場合には、凸最適化問題の解によって元の信号を高精度に推定できることが知られている。本研究でも凸最適化を利用する。

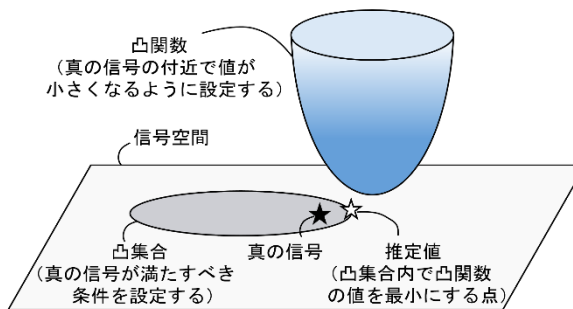


図3: 凸最適化を用いた信号推定概念図

本研究で用いる「不連続性を適応的に許容するスプライン関数」全体の集合は、各多項式の係数を並べて得られるベクトルに関する凸集合として表現できる。また、「スプライン関数と観測データとの整合性(=2乗誤差)」や「スプライン関数の滑らかさ(=関数の変動エネルギー=2階微分の2乗の積分値)」は係数ベクトルに関する二次形式として凸関数で表現できる。これらに加えて更に、「エッジに関する性質」を凸関数として適切に表現することによって係数ベクトルに関する凸最適化問題を構築し、その解として区分的に滑らかな関数を推定する。このために、まずはエッジに関する性質を的確に捉えた凸関数を設計する。その後、データ整合性や関数の滑らかさも考慮した凸最適化問題を解く。更に、最適化アルゴリズムの高速化も行う。

### 4. 研究成果

(1) 通常のスプライン関数は、図1のように観測データの座標点で多項式が切り替わる。一方、本研究のスプライン関数は、図2のように観測座標点間の中心で多項式が切り替わる。そして、いくつかの箇所では隣接する多項式間の不連続性を適応的に許容し、残りの箇所では多項式を微分値も含めて連続に接続することで、エッジを含む区分的に滑らかな関数を推定する。提案手法では、「データ整合性」、「エッジを除く箇所での関数全体の滑らかさ」、「エッジ数」の3項の重み付き和の最小化問題として、エッジ保存スプライン平滑化を定式化した。エッジ数はある種

のブロック00 ノルムとして表現でき、この非凸関数をブロック01 ノルムに凸緩和することで、提案手法を凸最適化問題として定式化することに成功した。提案手法が、従来のスプライン平滑化や離散標本値のみを推定するアプローチよりも優れた推定精度を示す(図4)ことを、信号処理分野のトップカンファレンスである「IEEE ICASSP」で発表した。この成果は、エッジを含む関数の推定に向かないと従来考えられていたスプライン関数に、新たな応用可能性を提示するものであり、使い勝手が向上すれば、スプライン関数の応用領域を大いに押し広げる可能性を秘めている。そのためには、今後以下の2点を改善する必要がある。

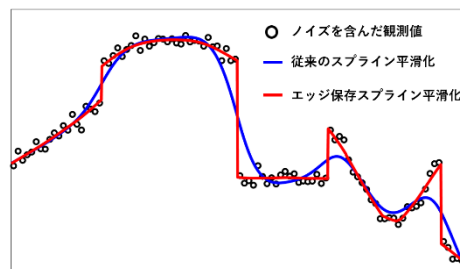


図4: エッジを含む関数の推定結果

1つは、「データ整合性」、「エッジを除く箇所での関数全体の滑らかさ」、「エッジ数」の各項の重み(重要度)を現在は手動で調整しているが、これを推定対象に応じて自動調整できるようにすることである。もう1つは、凸最適化問題を解く際にかかる計算時間を可能な限り短縮することである。後者に関しては、KAUSTのL. Condat博士との共同研究で、凸最適化アルゴリズムの一種である「前方後方分離アルゴリズム」のステップサイズの拡張に成功しており、応用数学分野のトップジャーナルである「SIAM Review」に60頁を超える論文が出版され、既に多数引用されている。この方法を用いれば、エッジ保存スプライン平滑化の計算時間も一部短縮できる。

(2) エッジ保存スプライン平滑化で解く凸最適化問題は、数学的には「ブロックスパース信号復元問題」と分類できる。これに関連して、当初予期していなかった高速MRIや気象レーダといった応用で、それぞれMR画像再構成やビームフォーミング(BF)を「ブロックスパース信号復元問題」として捉えることで成果を上げることができた(図5、図6)。

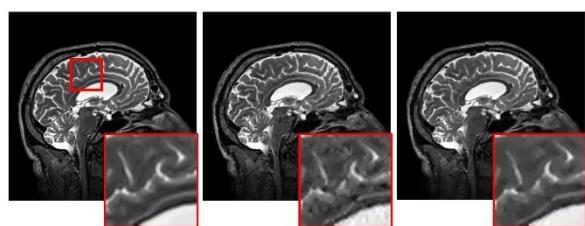


図5: 撮像時間1/7のMRIにおける画像再構成

近年、00ノルムの優れた凸緩和を利用した「LiGMEモデル」と呼ばれるスパース信号復元手法が提案されている。MR画像再構成の従来手法(図5b)をブロックスパース信号復元と捉え、これにLiGMEモデルを導入することで、比較的大規模な画像復元問題におけるLiGMEモデルの有効性を世界で初めて示すことに成功し(図5c)、この成果を国際会議「EUSIPCO」で発表した。

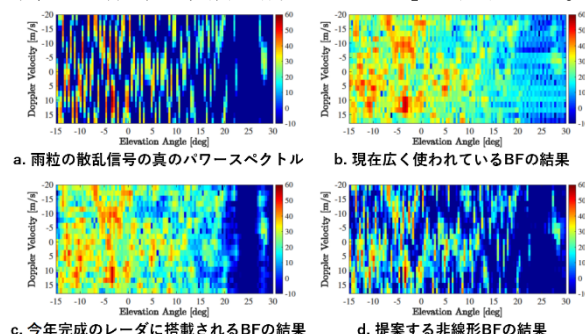


図6: 気象レーダ用BF手法の比較実験

アレイ信号処理で重要なBFは孤立型標的を想定して設計されてきたが、気象レーダの標的となる雨粒は分布型標的であり、従来の線形BFでは高分解能化が原理上困難であった(図6b、図6c)。雨粒の散乱信号は図6aのように周波数領域(パワースペクトル)でブロックスパース信号となる。この性質に基づいた凸最適化問題を構築し、それを解く非線形BFによって従来の約3倍という大幅な高分解能化に成功した(図6d)。この論文は、リモートセンシング分野のトップジャーナルである「IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing」に出版されており、今後は非線形BFの実際のレーダへの導入を目指す。また、長岡技科大の黒田大貴博士と共に開発した「ブロックスパース性の優れた評価尺度」を纏めた論文も「IEEE Transactions on Signal Processing」に出版され、今後の応用が期待される。

(3) 連続関数推定の代表例である回帰問題に対しても、新たなスプライン平滑化手法を開発した。具体的には、単調性や凸・凹性を保証したスプライン関数を用いて、パーセントイル曲線やデータの最頻出領域を推定した(それぞれ、分位点回帰・最頻区間回帰という)。提案手法

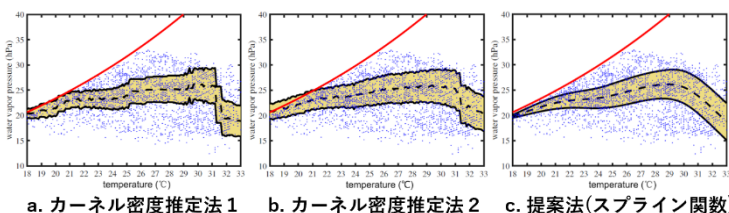


図7: 50%最頻区間の回帰結果(横軸:気温、縦軸:水蒸気圧)

の回帰曲線は滑らかで所望の条件も満足するため、従来手法よりも視覚的及び数値的に良好な推定結果をもたらす。水蒸気圧のデータ解析時には、飽和水蒸気圧(図7赤線)を回帰曲線の上限に設定して最頻区間回帰を行った(図7c)。従来のカーネル密度推定法(図7a、図7b)と比べて、提案手法では滑らかで飽和水蒸気圧も超えていない良好な回帰結果が高速に算出された。この成果はジャーナル論文として「IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences」に出版され、様々なデータ解析への応用が期待される。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 北原 大地	4. 巻 78
2. 論文標題 区分的多項式とスプライン関数の基礎 - 折れ線グラフを曲線にしてみよう -	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本音響学会誌	6. 最初と最後の頁 570-577
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20697/jasj.78.10.570	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 S. Yao, D. Kitahara, H. Kuroda, and A. Hirabayashi	4. 巻 E106-A
2. 論文標題 Modal interval regression based on spline quantile regression	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 106-123
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transfun.2022EAP1031	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 L. Condat, D. Kitahara, A. Contreras, and A. Hirabayashi	4. 巻 65
2. 論文標題 Proximal splitting algorithms for convex optimization: A tour of recent advances, with new twists	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 SIAM Review	6. 最初と最後の頁 375-435
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1137/20M1379344	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 H. Kuroda and D. Kitahara	4. 巻 70
2. 論文標題 Block-sparse recovery with optimal block partition	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Signal Processing	6. 最初と最後の頁 1506-1520
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TSP.2022.3156283	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 D. Kitahara, H. Kuroda, A. Hirabayashi, E. Yoshikawa, H. Kikuchi, and T. Ushio	4. 巻 60
2. 論文標題 Nonlinear beamforming based on group-sparsities of periodograms for phased array weather radar	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 1-19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TGRS.2022.3154118	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 H. Yamamoto, D. Kitahara, H. Kuroda, and A. Hirabayashi	4. 巻 105-A
2. 論文標題 Image super-resolution via generative adversarial networks using metric projections onto consistent sets for low-resolution inputs	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 704-718
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transfun.2021EAP1038	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Yoshimoto, H. Kuroda, D. Kitahara, and A. Hirabayashi	4. 巻 42
2. 論文標題 WaveNet modeling of distortion pedal using spectral features	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Acoustical Science and Technology	6. 最初と最後の頁 305-313
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1250/ast.42.305	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 H. Kamoshita, D. Kitahara, K. Fujimoto, L. Condat, and A. Hirabayashi	4. 巻 E104-A
2. 論文標題 Multiclass dictionary-based statistical iterative reconstruction for low-dose CT	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 702-713
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transfun.2020EAP1020	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 R. Kawami, D. Kitahara, A. Hirabayashi, E. Yoshikawa, H. Kikuchi, and T. Ushio	4. 巻 140
2. 論文標題 Three-dimensional data compression and fast high-quality reconstruction for phased array weather radar	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems	6. 最初と最後の頁 40-48
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejieiss.140.40	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計29件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 13件)

1. 発表者名 H. Kuroda and D. Kitahara
2. 発表標題 Graph-structured sparse regularization via convex optimization
3. 学会等名 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Kuroda, D. Kitahara, E. Yoshikawa, H. Kikuchi, and T. Ushio
2. 発表標題 Sparsity and smoothness regularized estimation of power spectral density and its application to weather radar
3. 学会等名 第37回信号処理シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Kuroda, D. Kitahara, E. Yoshikawa, H. Kikuchi, and T. Ushio
2. 発表標題 Sparsity-smoothness-aware power spectral density estimation with application to phased array weather radar
3. 学会等名 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年



1. 発表者名 H. Kuroda, D. Kitahara, and A. Hirabayashi
2. 発表標題 A convex penalty for block-sparse signals with unknown structures
3. 学会等名 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 D. Kitahara, R. Kato, H. Kuroda, and A. Hirabayashi
2. 発表標題 Multi-contrast CSMRI using common edge structures with LiGME model
3. 学会等名 European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Kuroda and D. Kitahara
2. 発表標題 Exploiting graph-structured sparsity via convex optimization
3. 学会等名 第36回信号処理シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 少路 春希, 吉本 健人, 阪 大樹, 黒田 大貴, 北原 大地, 田中 賢一郎, 平林 晃
2. 発表標題 ファインチューニングを利用した歪みエフェクタの高速モデリング
3. 学会等名 電子情報通信学会信号処理研究会
4. 発表年 2022年

1 . 発表者名 Y. Takahashi, D. Kitahara, K. Matsuura, and A. Hirabayashi
2 . 発表標題 Determined source separation using the sparsity of impulse responses
3 . 学会等名 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP 2020) (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 R. Nakatsu, D. Kitahara, and A. Hirabayashi
2 . 発表標題 Non-Griffin-Lim type signal recovery from magnitude spectrogram
3 . 学会等名 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP 2020) (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 H. Yamamoto, D. Kitahara, and A. Hirabayashi
2 . 発表標題 Image super-resolution via generative adversarial network using an orthogonal projection
3 . 学会等名 European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2020) (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 D. Kitahara, K. Leng, Y. Tezuka, and A. Hirabayashi
2 . 発表標題 Simultaneous spline quantile regression under shape constraints
3 . 学会等名 European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2020) (国際学会)
4 . 発表年 2020年



1. 発表者名 K. Yoshimoto, H. Kuroda, D. Kitahara, and A. Hirabayashi
2. 発表標題 Deep neural network modeling of distortion stomp box using spectral features
3. 学会等名 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 北原 大地, 小川 佳瑚, 金銅 美陽, 平林 晃
2. 発表標題 4階テンソル構造を利用したライトフィールドノイズ除去
3. 学会等名 第33回回路とシステムワークショップ
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 北原 大地
2. 発表標題 スプライン関数の基礎と分位点回帰への応用
3. 学会等名 電子情報通信学会信号処理研究会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 北原 大地
2. 発表標題 周波数間引き短時間フーリエ変換の提案
3. 学会等名 第35回信号処理シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 北原 大地, 加藤 里佳子, 黒田 大貴, 平林 晃
2. 発表標題 エッジ情報とLiGMEモデルを用いたマルチコントラスト圧縮センシングMRI
3. 学会等名 第35回信号処理シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Kuroda, D. Kitahara, and A. Hirabayashi
2. 発表標題 Recovery of block-sparse signals with optimization of block partitions
3. 学会等名 第35回信号処理シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 D. Kitahara, L. Condat, and A. Hirabayashi
2. 発表標題 One-dimensional edge-preserving spline smoothing for estimation of piecewise smooth functions
3. 学会等名 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Kamoshita, T. Shibata, D. Kitahara, K. Fujimoto, and A. Hirabayashi
2. 発表標題 Low-dose CT reconstruction with multiclass orthogonal dictionaries
3. 学会等名 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 D. Kitahara, S. Ananda, and A. Hirabayashi
2. 発表標題 Optimization-based fundus image decomposition for diagnosis support of diabetic retinopathy
3. 学会等名 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Ananda, D. Kitahara, A. Hirabayashi, and K. R. U. K. Reddy
2. 発表標題 Automatic fundus image segmentation for diabetic retinopathy diagnosis by multiple modified U-Nets and SegNets
3. 学会等名 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 北原 大地, 手塚 祐司, 関根 理, 冷 可, 姚 賚, 東 長佳, 山本 有香子, 小林 純, 鷺山 美樹, 巖西 真規, 平林 晃, 柏木 厚典
2. 発表標題 2型糖尿病患者における性差を考慮したBMIと残余リスクの管理状況の関係
3. 学会等名 第62回日本糖尿病学会年次学術集会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 北原 大地, 森川 侑奈, 平林 晃, 吉川 栄一, 菊池 博史, 牛尾 知雄
2. 発表標題 フェーズドアレイレーダにおける隣接仰角間の類似性を利用した気象パラメータ推定
3. 学会等名 第32回回路とシステムワークショップ
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋 悠希, 北原 大地, 平林 晃
2. 発表標題 インパルス応答のスパース性を用いた教師あり独立低ランク行列分析
3. 学会等名 日本音響学会2019年秋季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松浦 功一郎, 平林 晃, 北原 大地
2. 発表標題 マルチトラック楽曲におけるGANを用いた大楽節の自動生成
3. 学会等名 日本音響学会2019年秋季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中津 龍星, 北原 大地, 平林 晃
2. 発表標題 振幅スペクトログラムからの非Griffin-Lim型音源信号復元手法
3. 学会等名 第34回信号処理シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 D. Kitahara, K. Leng, Y. Tezuka, and A. Hirabayashi
2. 発表標題 Functional data analysis between two random variables by multilevel monotone splines
3. 学会等名 第34回信号処理シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉本 健人, 北原 大地, 平林 晃
2. 発表標題 スペクトル特徴量を利用した深層学習による歪みエフェクタの高精度モデリング
3. 学会等名 電子情報通信学会信号処理研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 滝本 健人, 北原 大地, 平林 晃, 牛尾 知雄
2. 発表標題 フェーズドアレイ気象レーダのための時空間的特徴を利用した高精度ビームフォーミング
3. 学会等名 2020年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究者 個人WEBページ <a href="https://lab.d-kitahara.com/">https://lab.d-kitahara.com/</a>
---

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
サウジアラビア	KAUST			
フランス	Universite Grenoble Alpes			
インド	NMAM Institute of Technology			