

平成22年6月1日現在

研究種目：若手研究(B)
研究期間：2008～2009
課題番号：20700164
研究課題名（和文） 非線形スパース標本化理論と超解像への応用
研究課題名（英文） Sampling theory for sparse signals and its applications to image super-resolution
研究代表者 平林 晃 (HIRABAYASHI AKIRA) 山口大学・大学院医学系研究科・准教授 研究者番号：50272688

研究成果の概要（和文）：本研究では、スパース信号に対する複数チャンネル標本化と、スパースサンプリングに基づく画像特徴量抽出に関する研究に取り組んだ。前者は主に初年度の課題であり、信号の事前分布と  $l_1$  ノルム最小化原理をそれぞれ利用した2種類の信号再構成アルゴリズムを提案した。また、次年度は主に後者に取り組み、画像に含まれる直線エッジの完全抽出アルゴリズムを開発した。そして、提案手法の雑音耐性が従来手法より約 10dB 優れていることを計算機実験により示した。

研究成果の概要（英文）：We studied multi-channel sampling for sparse signals and image feature extraction using the sampling scheme. The former was mainly tackled in the first year, and we proposed two algorithms; one is the so-called MAP estimation algorithm with a prior distribution of signals, and the other is the  $l_1$ -norm minimization algorithm. In the second year, we devised an exact line-edge extraction algorithm that can be applied for super-resolution. We showed by computer simulations that the proposed method is approximately 10 dB better against noise than the conventional methods.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：信号処理，画像処理

科研費の分科・細目：情報学・知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：スパース性，標本化，マルチチャンネル標本化，MAP 推定， $l_1$  ノルム最小化，単位長自由度有限信号，画像特徴量抽出

## 1. 研究開始当初の背景

画像や信号のスパース性とは、その値そのものか、あるいはそれをフーリエ変換や微分作

用素などによって変換した結果のいずれかがほとんど零であり、非零の情報は一カ所に集中せずに散らばっていることを意味している。この性質は、センシングされた結果の

信号や画像に対しては圧縮の基本原理に用いられており、近似的には成立することが広く知られている。しかし、センシングそのものに対しては、これまであまり活用されてこなかった。スパース性を利用したセンシングやサンプリングが議論されるようになったのは21世紀に入ってからであり、特にこの数年で活発になってきた。その証左として、IEEE Signal Processing Magazine の2008年2月号ではスパース標本化に関する論文が特集されている。

こうした議論の中心的存在の一人がスイス連邦工科大学ローザンヌ校のVetterli教授である。同教授は、自身の提案によるrate of innovation という概念によってスパース信号を特徴づけられることを示し、非線形アルゴリズムによって対象信号を完全再構成できることを示している。また、カリフォルニア工科大学のCandes教授らは、数百万画素の画像を経由することなく、圧縮後の情報を直接獲得し、その情報からL1ノルム最小化原理によってほとんどの場合に対象信号を完全再構成できることを示している。このように海外では多くの著名な研究者が競って研究を進めており、重要な国際会議にて基調講演が行われてきた。一方、国内では信号処理や画像処理の分野で標本化理論の専門家は皆無である。一部の数学者が議論しているが、工学的応用はほとんど志向されてこなかった。

ところで、国外における先行研究において想定されてきた標本化は単一チャンネルであった。一般に信号は、高密度の標本化を行えば行うほど、標本化に伴う情報損失を低減でき、より精密な信号再構成が可能になる。しかし、物理的、あるいは経済的な理由から、高密度標本化が常に可能とは限らない。このような場合に、低密度の標本化を、位置ずれを伴いながら繰り返し行うことで、高密度標本化と同じ効果を得ることができる。しかし、スパース信号に対する複数チャンネル標本化に関する研究はこれまで行われてこなかった。

また本研究では、スパース標本化の応用として超解像処理に取り組んだ。一般に超解像は、位置合わせ処理と復元処理の2段階に分けて実行される。第1の位置合わせ処理の精度が第2段階の復元処理に大きな影響を与えるので、位置合わせをできる限り正確に行う必要がある。しかし、従来の位置合わせ手法では、それに用いる特徴量の抽出精度が低く、十分な精度の位置合わせを実現できていなかった。この問題を解決するために、スパースサンプリングに基づいた直線エッジの正確な抽出アルゴリズムが提案されていたが、雑音に対して頑健でないという問題があった。

また、Vandewalleらが標本化理論を用いた位置合わせ処理の研究を行っているが、平行移動だけに着目した基礎理論であり、回転・拡大を考慮した実用的アルゴリズムは開発されていなかった。

## 2. 研究の目的

このような状況を踏まえ、本研究では以下の2項目を目的に設定した。

- (1) 標本化を単一チャンネルから複数に拡張した場合のスパース信号再構成アルゴリズムの開発
- (2) 雑音に対して頑健な画像直線エッジ抽出アルゴリズムの開発

第1項目では、複数チャンネル間の関係が未知の場合に、その関係と対象信号の両方を推定する必要がある。例えば、低解像度カメラで手ブレを伴いながら複数の画像を撮影し、それらから高解像度画像を生成する超解像処理が典型例であり、複数のエンコーダーを用いて音信号をサンプルする場合も本問題に該当する。このようにチャンネル間関係が未知の場合、標本化は非線形推定問題となる。

第2項目では画像の撮像系の点広がり関数(Point Spread Function, PSF)のモデル化が重要になってくる。PSFを測定すると図1の黒い点線になることが報告されている。この関数を従来手法ではB-Spline関数でモ

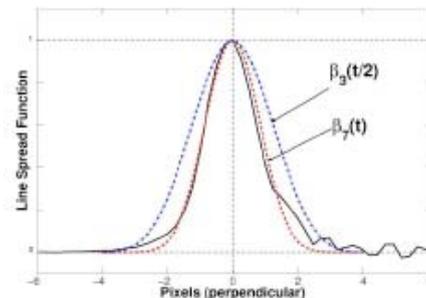


図1：点広がり関数の推定と近似

デル化していた。ところが、このことが雑音に対する頑健性を低減させる原因になっていたのである。別の関数を用いてモデル化することが重要になってくる。

## 3. 研究の方法

上記の目的を実行する為に、以下のように研究を遂行した。

- 1) 2008年度  
主に第1の課題に取り組んだ。その際、信

号の前提知識として、事前分布を用いる場合と、スパース性のみを用いる場合の2種類を考えた。それぞれに対して、再構成アルゴリズムを開発した。

## 2) 2009年度

主に第2の課題に取り組んだ。モデル化には次節で詳しく述べる E-spline 関数を用いた。また、研究を集中的に進展させるために、インペリアル大学の Dr. Dragotti 研究室に3ヶ月間の滞在を行った。

## 4. 研究成果

### 4. 1 複数チャンネル標本化

2種類的前提知識をそれぞれ独立に用いた解決手法を開発した。観測対象信号の事前分布を用いた場合には、事後確率最大化(MAP)法に基づくアルゴリズムを開発した。スパース性のみを用いた場合については、類似の先行研究である Compressed Sensing で用いられている  $l_1$  ノルム最小化原理を応用したアルゴリズムを開発した。図2に第1のアルゴリズムによる信号再構成結果を示す。推定対象関数を黒の実線で、提案手法による推定結果を赤の実線で、従来手法による結果を緑の実線で示す。提案手法の有効性が確認できた。

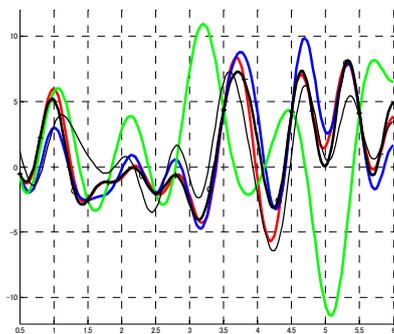


図2：信号推定シミュレーション

### 4. 2 画像特徴量抽出

PSFのモデル化に Trigonometric E-spline と呼ばれる関数を用いることにより、雑音に対してより頑健な性能を有する直線エッジ抽出手法を開発した。Trigonometric E-spline 関数は、三角多項式を表現でき、かつコンパクトサポートをもつ関数であり、B-spline に類似した形状を表現できる。提案手法は、画像に雑音が含まれない場合には、従来手法と同様に直線エッジの表現パラメータである振幅、方向角、切片を正確に求めることができる。そして、画素に雑音が含ま

れている場合には、B-spline を用いた従来手法に比べて、信号対雑音比が 10dB であるときに、方向角は 1.86 dB、切片は 9.64 dB 改善されることを計算機実験により示した。信号雑音比[dB]に対する方向角推定結果の標準偏差[dB]を図3に示す。提案手法と従来手法の結果をそれぞれ赤と青の実線で示す。信号雑音比が 7dB の場合以外で提案手法が従来手法を上回っていることがわかる。

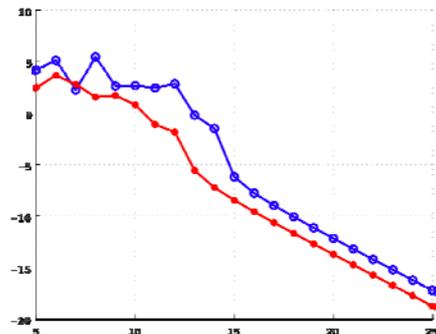


図3：方向角推定シミュレーション

また、Canny 法を前処理として用いることにより、局所的な直線エッジを抽出可能であることを示した。図4の左上が原画像、右上が Canny 法によるエッジ検出結果である。下の左右がそれぞれ、提案手法とハフ変換による直線抽出結果である。提案手法が正確に抽出できているのに対して、ハフ変換は誤検出していることがわかる。この成果を超解像処理に適用することにより、雑音に対して頑健な処理を行えることを示した。

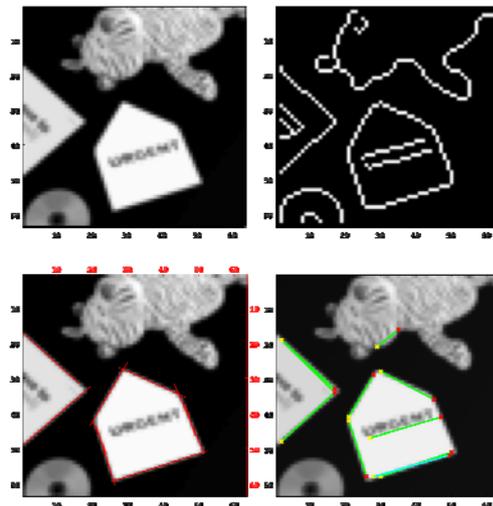


図4：直線エッジ推定シミュレーション

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Akira Hirabayashi, “Fast surface profiling by white-light interferometry using symmetric spectral optical filter,” *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, vol. E93-A, no. 2, pp. 542-548, Feb. 2010, 査読有
- ② Akira Hirabayashi, “Consistent sampling and efficient signal recovery,” *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 16, no. 12, pp. 1023-1026, Dec. 2009, 査読有.

[学会発表] (計 10 件)

- ① 川口悠仁, 平林晃, Pier-Luigi Dragotti, “E-Spline 標本化による画像直線エッジの正確な抽出,” 電子情報通信学会 2010 年総合大会講演論文集, no. A-4-12, p. 85, 仙台, 2010 年 3 月 17 日, 査読無.
- ② 平林晃, Pier-Luigi Dragotti, “単位長自由度有限信号に対する標本化理論と画像特徴量抽出への応用,” 電子情報通信学会技術研究報告, 信号処理研究会, no. SIP2009-104, pp. 179-184, 宮古島, 2010 年 3 月 2 日, 査読無.
- ③ A. Hirabayashi, “Joint estimation of offset parameters and high-resolution images via l1-norm minimization principle,” in *Proceedings of the Third ACM/IEEE International Conference on Distributed Smart Cameras (ICDSC 2009)*, Como, Italy, 2009 年 9 月 2 日, 査読有.
- ④ 平林晃, “Compressed sensing -基本原理と最新研究動向-,” 電子情報通信学会技術研究報告, 信号処理研究会, no. SIP2009-28, pp. 55-60, 釧路, 2009 年 7 月 1 日, 査読無, 招待講演.
- ⑤ A. Hirabayashi, “A study on sparse signal reconstruction from interlaced samples by l1-norm minimization,” in *Proceedings of the 2009 International Conference on Sampling Theory and Applications (SampTA2009)*, Marseille, France, 2009 年 5 月 21 日, 査読有.
- ⑥ H. Ogawa and A. Hirabayashi, “Optimal characteristics of optical filter for white-light interferometry based on sampling theory,” in *Proceedings of the 2009 International Conference on Sampling Theory and Applications (SampTA2009)*, Marseille, France, 2009 年 5 月 19 日, 査読有.

- ⑦ 平林晃, 栗谷公祐, “L1 ノルム最小化によるインターレース標本値からのスパース信号再構成,” 電子情報通信学会技術研究報告, 信号処理研究会, no. SIP2008-199, pp. 197-200, 岐阜, 2009 年 3 月 3 日, 査読無.
- ⑧ 平林晃, “インターレース標本値からのスパース信号の完全再構成,” 電子情報通信学会 2009 年総合大会講演論文集, no. A-4-3, p. 107, 松山, 2009 年 3 月 18 日, 査読無.
- ⑨ 平林晃, “スパース信号のインターレースサンプリングからの完全再構成に関する一考察,” 電子情報通信学会信号処理シンポジウム, no. A2-1, pp. 17--22, 金沢, 2008 年 11 月 13 日, 査読無.
- ⑩ A. Hirabayashi and L. Condat, “A study on an interlaced sampling with unknown offsets,” in *Proceedings of the 16th European Signal Processing Conference 2008 (EUSIPCO2008)*, Lausanne, Switzerland, 2008 年 8 月 28 日, 査読有.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○ 出願状況 (計 0 件)

○ 取得状況 (計 1 件)

名称: 表面形状測定方法及びその装置  
発明者: 小川英光, 平林晃, 北川克一  
権利者: 東レエンジニアリング株式会社, 国立大学法人東京工業大学  
種類:  
番号: 特許第 4 2 4 6 3 2 6 号  
取得年月日: 平成 2 1 年 1 月 1 6 日  
国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等 なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平林 晃 (HIRABAYASHI AKIRA)

山口大学・大学院医学系研究科・准教授

研究者番号: 5 0 2 7 2 6 8 8

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

Pier-Luigi Dragotti

ロンドンインペリアル大学

研究者番号: なし