

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 3 日現在

機関番号：32503

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26330204

研究課題名(和文) 集合論的画像モデルの構築と画像復元・再構成問題への応用

研究課題名(英文) Set-theoretic image model and its application to image recovery and reconstruction

研究代表者

中静 真 (NAKASHIZUKA, Makoto)

千葉工業大学・工学部・教授

研究者番号：10251787

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、集合論的な画像処理の体系であるマセマティカルモフォロジーを画像の復元・再構成問題へ応用すること、および、既存のモフォロジーを拡張し、新しい非線形フィルタの体系を構築することにある。復元・再構成問題への応用では、集合演算で定義される画像の輝度変化を先見情報とする正則化法を提案し、画像の細部を保存しつつ、ガウス性雑音を除去する雑音除去法、および画像の局所構造のサイズに基づく成分分離法を提案した。既存のモフォロジーの拡張では、集合論的画像処理の構成要素である最大値関数、最小値関数を凸関数と凹関数のクラスへ拡張し、モフォロジーの高速処理の特性を生かしつつ、高精度の画像処理を実現した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we address the applications of set-theoretic image modeling to problems of the image recovery and reconstruction. We have applied the morphology, which provides a class of the set-theoretic image processing, to image recovery and reconstruction problems. We also extended the morphology to a novel class of nonlinear filtering. In the application of the image recovery, the regularization with a prior obtained from the set-theoretic image features is proposed. By using the morphological image priors, the image denoising that can preserve details of images is proposed. The image decomposition according to the sizes of local structures is also proposed by using the set-theoretic image features. In the extension of the morphology, the max and min functions of the morphology are extended to the class of convex and concave functions, respectively. We demonstrated that the novel nonlinear can outperform the morphological filter with relatively small computational costs.

研究分野：信号処理

キーワード：画像処理 画像復元 マセマティカルモフォロジー 雑音除去 正則化

## 1. 研究開始当初の背景

信号処理・画像処理の手法を大きく二つに大別すると、フィルタリングに基づく方法と対象に関する先見的な知識から所望の信号を復元・再構成する方法の二つに大別される。後者は、先見情報と観測された対象から、劣化を受ける前の画像を推定する逆問題と考えることができる。

画像処理のためのフィルタリング法には、ボケや鮮鋭化を目的とした線形フィルタ、エッジ保存性が良好な非線形フィルタがある。モフォロジカルフィルタ、また、モフォロジカルフィルタを含む画像処理体系としてマセマティカルモフォロジーは、非線形フィルタの一つであり、現在まで画像の強調、特徴抽出等、幅広く用いられてきた。マセマティカルモフォロジーは、集合演算に基づく画像処理体系であり、画像を輝度と座標から構成される3次元集合と捉えて、特定の構造のみを抽出、除去するなど、他のフィルタには見られない特性を持つ。このモフォロジーは、フィルタリングの手法として提案された方法であり、信号・画像の復元・再構成問題へ応用された研究例はほとんどない。

以上を踏まえ、本課題研究の目的は、マセマティカルモフォロジーの特性を画像の復元・再構成問題へ応用すること、および、既存のモフォロジーを拡張し、新しい非線形フィルタの体系を構築することにある。マセマティカルモフォロジーの特徴を画像の復元・再構成問題へ適用することで、既存の画像復元では達成できなかった応用を提案することが目的である。さらに、集合論的な画像処理体系であるマセマティカルモフォロジーを拡張し、モフォロジー本来の低演算量の性質を生かしつつ、画像処理の性能を向上させることも目的としている。

## 2. 研究の目的

前章で述べた研究開始時の背景を踏まえ、以下に述べる二つの課題を目的とした。

### (1) 集合論的画像特徴を先見情報とする画像復元・再構成問題

既存の画像復元問題においては、画像に関する先見的な情報として、画像の輝度変化に関する仮定が用いられてきた。これは、画像の大部分の領域が平坦であり、輝度変化が発生せず、領域の境界部、すなわちエッジのみ疎らに輝度変化が発生するとの仮定である。この輝度変化に関する仮定に基づき、画像の復元・再構成問題を扱うために、全変動 (Total Variation) ノルムが画像の正則化法のための画像先見情報として広く用いられて

きた。これは、線形フィルタから得られる先見情報であり、画素間の差分から与えられる輝度変化を抑制することから、画像中に現れる細かなテクスチャが平滑化を受け、平坦に再現される問題点があった。

集合論的な画像体系であるモフォロジーの分野においては、画像の輝度勾配に対応する特徴量として、画像の小領域における集合演算から得られるモフォロジカル勾配が提案されている。モフォロジカル勾配を計算する領域を適切に設定することで、繰り返し現れる線分などの微細構造に対して輝度変化の抑制を抑え、平坦部における雑音を抑圧することが可能となる。そこで、モフォロジカル勾配を先見情報とする画像の復元・再構成問題の定式化、さらにモフォロジカル勾配を持つ関数の最小化法とその応用を目的とした。モフォロジカル勾配は最大値関数と最小値関数から定義され、導関数に不連続点を持つ関数である。復元問題における最小化問題の目的関数は、これらの不連続点を持ち、勾配法の適用が難しい。近年提案された凸最適化の手法を導入することで、復元アルゴリズムを構築することも目的の一つである。

### (2) 集合論的画像処理の拡張とその学習

濃淡画像処理において、モフォロジーにおける集合演算は、画素値間での最大値・最小値演算に帰着する。最大値演算に基づくフィルタ処理をダイレーション、最小値演算に基づくフィルタ処理をエロージョンと呼ぶ。従来のモフォロジーの分野において、最大値関数と最小値関数の微分が不連続であることを理由として、モフォロジカルフィルタの最適化は困難な課題とされてきた。一方、ニューラルネットワークの分野において、最大値を用いた非線形関数が活性化関数として用いられている。ニューラルネットワークの学習では、微分が不連続な関数の最小化法においても改良された勾配法が適用されている。そこで、本研究では、モフォロジカルフィルタの学習法にニューラルネットワークの分野で利用されている確率的勾配降下法を導入し、大量の画像データから、最適なフィルタを導出することを検討する。さらに、ニューラルネットワークとモフォロジーの関連から、ニューラルネットワークの活性化関数を利用してモフォロジーを拡張し、性能を向上させることを目的とする。

## 3. 研究の方法

前章で述べた目的に対応し、研究の方法を述べる。

### (1) 集合論的画像特徴を先見情報とする画像復元・再構成問題

画像の先見情報として利用するモフォロジカル勾配が  $L1$ - $L\infty$  から定義されるノルムであることに着目し、画像復元・再構成問題を定式化した。この定式化から、最適化問題の目的関数が、 $L\infty$  ノルムと  $L2$  ノルムの和として与えられることを示し、凸最適化法の一つである ADMM(alternating direction method of multipliers)の適用を検討した。この方法では、目的関数を二つに分離させ、それぞれの近接写像を繰り返すことで、最小化を実現する。 $L\infty$  ノルムの近接写像から、効率の良い計算アルゴリズムを提案した。さらに、このアルゴリズムを用いて、画像の雑音除去へ適用し、モフォロジカル勾配と既存の画像先見情報の比較を行った。さらに、複数のサイズで定義されたモフォロジカル勾配を同時に用いることで、画像をテクスチャ成分とカートゥーン成分に分離し、それぞれに異なるペナルティを与えることで、テクスチャの保存性に優れた雑音除去法を提案した。

## (2) 集合論的画像処理の拡張と学習

モフォロジカルフィルタで、保存もしくはは除去する画像の局所形状を決める部分集合を構造要素と呼ぶ。この構造要素を事例から学習し、雑音除去・補間の性能を向上させることを検討した。画像セットから、モフォロジカルフィルタの一つであるオープニングフィルタの構造要素を、多種の雑音、劣化に対して学習し、その性能の向上を検討した。また、ニューラルネットワークの活性化関数である Maxout 関数を用い、最大値関数を凸関数のクラスへ、また、最小値関数のクラスを凹関数のクラスへ拡張する。拡張に伴い増加したパラメータも、確率的勾配降下法による学習を適用した。

## 4. 研究成果

本研究による主たる成果を、2. 目的で示した二つの項目につき、それぞれ説明する。

### (1) 集合論的画像特徴を先見情報とする画像復元・再構成問題

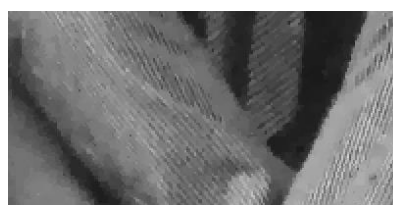
モフォロジカル勾配を用いた正則化法により、画像雑音除去と画像の局所構造のサイズに依存した成分分離を実現することができた。図 1 に雑音除去例を示す。この例では、画像に対して、 $2 \times 2$  画素および  $3 \times 3$  画素の局所領域でモフォロジカル勾配を定義し、これを画像の先見情報とした正則化による雑音除去の結果を示している。比較として TV ノルム最小化の例も示している。TV ノルム最小化と  $2 \times 2$  画素のモフォロジカル勾配による正則化の結果は、ほぼ同等の雑音除去結



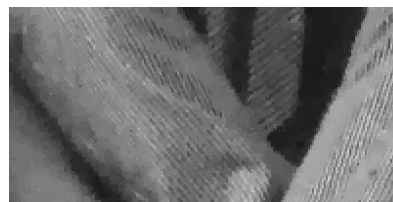
原画像



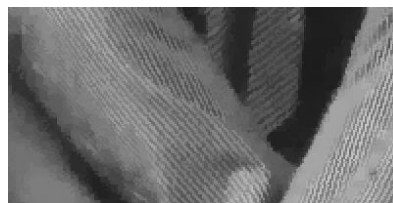
雑音重畳画 ( $\sigma = 20$ )



TV



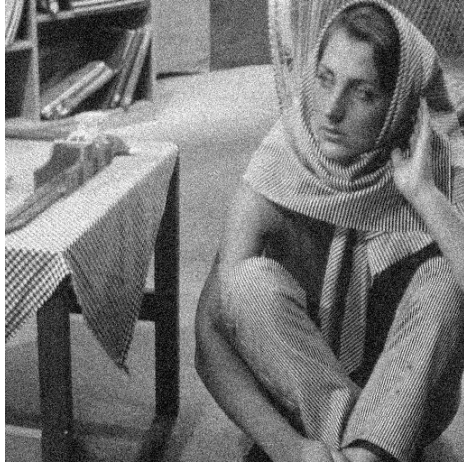
モフォロジカル勾配 ( $2 \times 2$ )



モフォロジカル勾配 ( $3 \times 3$ )

図 1. モフォロジカル勾配を先見情報とした正則化に基づく雑音除去

果となっているが、構造要素のサイズを拡大した場合、 $L\infty$  ノルムの性質から、画像に繰り返し発生している細線部を保存した雑音除去画像が得られていることがわかる。さらに、 $2 \times 2$ 、 $4 \times 4$  の領域で定義されるモフォロジカル勾配それぞれを二つの画像成分に先見情報として与え、画像を分離した例を図 2 に示す。この例では、モフォロジカル勾配のサイズに応じて、画像のテクスチャが分離されていることがわかる。提案したモフォロジカル勾配に基づく正則化法は、モフォロジ



雑音重畳画像



画像骨格成分 (サイズ  $2 \times 2$ )



テクスチャ成分 (サイズ  $4 \times 4$ )

図 2. 画像成分分離の例

一の構造要素と画像の局所構造のサイズに沿って成分毎に分離, さらに特定の構造を保存した雑音除去ができることがわかった.



劣化画像



復元画像

図 3. ランダムな欠損を受けた画像の復元例

## (2) 集合論的画像処理の拡張と学習

モルフォロジカルフィルタの一つであるクロージングフィルタのダイレクションとエロージョンを, それぞれ Maxout 関数により凸フィルタと凹フィルタへ拡張した. また, 凸フィルタと凹フィルタの畳み込み演算の係数を確率的勾配降下法で学習することにより, 画像の欠損復元を実現する非線形フィルタを提案した.

画像処理例を図 3 に示す. ここでは 75% の画素が欠落した画像に対して, フィルタ処理を適用することで, 欠損位置の情報をもとに TV ノルム正則化を適用した場合と同等の復元精度を得ることができた. さらに図 4 には, 文字によりマスクされた領域の復元の例を示す. これらの例において, 計算時間は TV ノルム正則化の  $1/4$  以下であり, さらに GPU による並列計算により 10 倍以上の高速化が達成できた.

今後, 集合論的画像処理の拡張により得ら



文字でマスクされた画像



復元画像

図 4. 文字列でマスクされた画像の復元例

れた成果を、画像復元・再構成問題へ適用し、事前情報の学習、それに基づく画像処理を検討する予定である。

#### 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 1 件)

- ① Makoto Nakashizuka, “Image recovery with soft-morphological image prior,” 査読有, IEICE Trans. On Fundamentals, Vol. E97-A, No.12, pp. 2633-2640, Dec. 2014.  
DOI:10.1587/transfun.E97.A.2633

[学会発表] (計 4 件)

- ① 中静 真, 小林 慧一郎, 石川 徹, 糸井 清晃, “Maxout 関数によるモフォロジカルフィルタの拡張”, 第 31 回信号処理シンポジウム, 2016 年 11 月 10 日, 関西大学 100 周年記念会館, 大阪府, 吹田市

- ② M. Nakashizuka, “Image regularization with multiple morphological gradient priors,” in Proc. IEEE Int’l Conf. on Image Processing, 2015 年 9 月 26 日, Phoenix Convention Center, Phoenix, USA.
- ③ M. Nakashizuka, “Image regularization with higher-order morphological gradients,” in Proc. EUSIPCO 2015, 2015 年 9 月 3 日, Nice Acropolis Convention Center, Nice, France.
- ④ M. Nakashizuka, “Image recovery with a prior based on local median,” in Proc. 2014 Int’l Workshop on Smart Info-Media Sys. in Asia, 2014 年 10 月 9 日, Hotel Majestic Saigon, Ho-Chi-Minh, Vietnam.

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

中静 真(NAKASHIZUKA MAKOTO)

千葉工業大学・工学部・教授

研究者番号:10251787